VISIT…

СПРАВОЧНИК МАШИНОСТРОИТЕЛЯ

В ШЕСТИ ТОМАХ

Том 2

Главный редактор тома
д-р техн. наук проф. *Н. С. АЧЕРКАН*

Издание второе,
исправленное и дополненное

40647

БИБЛИОТЕКА
П/Я. 80

МАШГИЗ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1956

АВТОРЫ ТОМА

М. С. АНЦЫФЕРОВ, канд. физ.-мат. наук, К. В. АСТАХОВ, проф., М. П. ВУКАЛОВИЧ, проф. д-р техн. наук, А. И. КОРЕЛИН, канд. техн. наук, Э. С. КРИПЕЦ, инж., Л. П. ЛАЗАРЕВ, канд. техн. наук, И. В. МАЗЫРИН, инж., В. М. МАТЮХИН, канд. техн. наук, Н. Н. НИКИТИН, канд. физ.-мат. наук, И. А. ПАНИЧКИН, канд. техн. наук, Б. С. ПЕТУХОВ, канд. техн. наук, Л. Г. ПОДВИДЗ, канд. техн. наук, А. Ф. СИМОНОВ, инж., А. П. СМИРЯГИН, канд. техн. наук, Э. М. ФАЙНЗИЛЬБЕР, проф. д-р техн. наук, Г. П. ХАЛИЗЕВ, канд. техн. наук, Б. И. ЯНЬШИН, канд. техн. наук.

Редактор инж. **М. Е. Маркус**

Редактор графических материалов инж. В. Г. Карганов

Редакция справочной литературы
Зав. редакцией инж. М. Е. Маркус

Адрес редакции: *Москва, 1-й Третьяковский пр., д. 1, Машгиз*

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОТА

Глава I. ОБЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТЕЛ (д-р техн. наук проф. *М. П. Вукалович*) 1

Температура 1
Термометры сопротивления 5
Термоэлементы (термопары) 8
Давление 9
Приборы для измерения давления 10
Удельный объем 13
Тепловое расширение 15
Теплоемкость 17
Температуры и теплоты плавления и испарения 37
Критическое состояние 37

Глава II. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА (д-р техн. наук проф. *М. П. Вукалович*) 40

Обозначения 40
Первый закон термодинамики 40
Второй закон термодинамики 41
Потери работы вследствие необратимости 42
Термодинамические функции 42
Дифференциальные уравнения термодинамики 43
Идеальный газ 44
Смеси газов 45
Основные газовые процессы 47
Циклы газовых двигателей 50
Циклы поршневых двигателей 51
Циклы реактивных двигателей 55
Процесс сжатия в одноцилиндровом компрессоре 57
Центробежный нагнетатель 59
Реальные газы 59
Водяной пар 61
Истечение газов и паров 90
Дросселирование (мятие) газов и паров . 92
Циклы паросиловых установок . . . 93
Термодинамические основы производства искусственного холода 97
Циклы холодильных машин 103
Тепловой насос 105
Циклы для совместного получения тепла и холода 105
Термотрансформаторы 106
Влажный воздух 107

Глава III. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА (канд. техн. наук *Б. С. Петухов*) 114

Общие сведения 114
Теплопроводность 115
Конвективный теплообмен 138
Теплообмен излучением 152
Основы расчета теплообменников 163

ГОРЕНИЕ. ТОПЛИВО. ВОДА. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава IV. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ (д-р техн. наук проф. *Э. М. Файнзильбер*) 170

Общие положения и определения 170
Расчет процесса горения 171

Глава V. ТОПЛИВО СССР (канд. техн. наук *А. И. Корелин*) 176

Общие сведения 176
Твердое топливо 178
Газообразное топливо 189

Глава VI. ВОДА (инж. *Э. С. Крипец*) . . . 193

Состав воды 193
Улучшение качества воды 195

Глава VII. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (инж. *И. В. Мазырин*) 204

Введение 204
Жидкие и смазочные масла 204
Консистентные смазки 214
Прочие смазочные материалы 221
Замена смазочных материалов 221
Присадки к смазочным материалам . . . 223

ОПТИКА И АКУСТИКА

Глава VIII. ОПТИКА (канд. техн. наук *Л. П. Лазарев*) 224

Основные определения 224
Источники света 225
Физическая оптика 226
Геометрическая оптика 228
Крепление оптических деталей 238

Основные типы оптических систем 240
Оптические приборы 245

Глава IX. АКУСТИКА (канд. физ.-мат. наук *М. С. Анцыферов*) 254

Основные определения 254
Акустические явления и их слуховое восприятие 256
Борьба с шумами 264

ХИМИЯ

Глава X. ХИМИЯ (проф. *К. В. Астахов*) . 269

Введение 269
Периодический закон и периодическая система элементов 269
Строение атомов и атомные константы . 271
Энергия связей двухатомных молекул . 280
Свойства элементов и их важнейших соединений 28
Энергия ионной кристаллической решетки 294
Теплоты плавления и испарения элементов и некоторых неорганических соединений 295
Свойства некоторых органических соединений 296
Теплоты и свободные энергообразования важнейших химических соединений . 304
Диффузия металлов в металлах 313

Глава X. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ (канд. техн. наук *А. П. Смирягин*) 316

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Глава XII. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ (канд. техн. наук *Г. П. Хализев* и инж. *А. Ф. Симонов*) 328

Обозначения и единицы электротехнических и магнитных величин 328
Электрическое поле. Конденсаторы . . . 330
Магнетизм и электромагнетизм 331
Основные законы. Цепи постоянного тока 337
Переменные токи 339
Электротехнические материалы 343
Проводки 350
Электрический ток в электролитах 354
Химические источники тока 356
Электроника 360
Электрические измерения 370

Глава XIII. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ (канд. техн. наук *В. М. Матюлин*) . 378

Общие сведения 378
Машины постоянного тока 381
Трансформаторы 392
Асинхронные электродвигатели 393
Синхронные электродвигатели 404
Универсальные электродвигатели 409

Глава XIV. ЭЛЕКТРОПРИВОД (канд. техн. наук *Г. П. Хализев*) 410

Механические характеристики и расчет пусковых сопротивлений 410
Статические механические характеристики системы генератор — двигатель 420
Динамика электропривода 421
Выбор электродвигателя 426

Глава XV. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ (канд. техн. наук *Г. П. Хализев*) 433

Общие сведения по аппаратуре 433
Схемы управления электродвигателями . 436

ГИДРАВЛИКА. ГИДРОАЭРОГАЗОДИНАМИКА

Глава XVI. ГИДРАВЛИКА (канд. техн. наук *Л. Г. Подвидз* и канд. техн. наук *Б. И. Яньшин*) 449

Некоторые физические свойства жидкостей 449
Давление в жидкости, его единицы . . . 454
Приборы для измерения давления . . . 455
Силы давления покоящейся жидкости на стенки 457
Закон Архимеда. Условия равновесия тела в жидкости 459
Относительный покой жидкости 460
Общие уравнения для потока реальной жидкости 463
Равномерное напорное движение 467
Равномерное безнапорное движение . . . 476
Истечение через отверстия и насадки . . 478
Истечение через щели 482
Истечение под переменным напором . . . 483
Водосливы 484
Местные сопротивления в трубопроводе . 485
Гидравлический удар в трубах 492
Расходомеры потоков в трубопроводах . 494
Расчет трубопроводов 498
Сила действия потока на граничные стенки 500

Глава XVII. ГИДРОАЭРОГАЗОДИНАМИКА (канд. физ.-мат. наук *Н. Н. Никитин* и канд. техн. наук *И. А. Паничкин*) 503

Гидроаэродинамика 503
Газодинамика 519
ПРЕДМЕТНЫЙ АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ (*С. Л. Хасьминский*) 531

ГЛАВА I

ОБЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

ТЕМПЕРАТУРА

Величины, определяемые статистическими закономерностями свойств тел, — температура, давление — называются *макроскопическими* или *термодинамическими* величинами.

Эти величины характеризуют свойства макроскопических тел, состоящих всегда из огромного числа частиц.

Термодинамические величины, определяющие состояние тела или системы, называются также термодинамическими параметрами или просто параметрами системы.

Температура — один из основных термодинамических параметров, определяющих макроскопическое состояние тела или системы тел.

Измерение температур при помощи приборов основывается на зависимости от температуры каких-либо свойств вещества, например теплового расширения, давления насыщенного пара, давления вещества в газообразном состоянии при постоянном объеме, или, наоборот, объема его при постоянном давлении, электрического сопротивления металлов, электродвижущей силы термоэлектрической пары, излучения и др.

Числовой отсчет температуры производится по шкале температур.

Температурная шкала устанавливается путем деления разности показаний термометра в двух, произвольно выбранных, постоянных температурных точках, называемых главными реперами, на некоторое равное число частей, называемых градусами.

Градус температуры — определенная доля интервала между главными реперами.

Так как выбор постоянных температурных точек и цены деления шкалы является произвольным, имеется несколько шкал температур.

Шкалы Реомюра (R), Цельсия (Ц) и Фаренгейта (F) образуются делением интервала на шкале термометра между температурой плавления льда и температурой кипения воды на равные части: в шкале Реомюра — на 80 равных частей, причем точка плавления льда обозначается через 0°, а точка кипения воды через 80°, в шкале Цельсия — на 100 частей (0 и 100°); в шкале Фаренгейта — на 180 частей (+32 и 212°).

Формулы перехода от одной шкалы к другой:

$$t^\circ \text{Ц} = \frac{5}{9}(t^\circ \text{F} - 32^\circ) = \frac{5}{4} t^\circ \text{R};$$

$$t^\circ \text{F} = 32^\circ + \frac{9}{5} t^\circ \text{Ц} = 32^\circ + \frac{9}{4} t^\circ \text{R};$$

$$t^\circ \text{R} = \frac{4}{5} t^\circ \text{Ц} = \frac{4}{9}(t^\circ \text{F} - 32^\circ).$$

Шкалы Реомюра, Цельсия и Фаренгейта основаны на явлении объемного расширения жидкостей — ртути или спирта.

Недостаток этих шкал — зависимость показаний термометра от рода термометрического вещества, поскольку каждое вещество отличается свойственным ему одному характером изменения термометрических свойств с температурой.

При точных измерениях в показания ртутного термометра необходимо вводить следующие поправки:

1) на неодинаковость сечения капилляра по длине;

2) на неточность отметки точек плавления льда и кипения воды;

эти две поправки можно учесть путем сличения с образцовым прибором;

3) на влияние внешнего давления на сосуд с ртутью термометра;

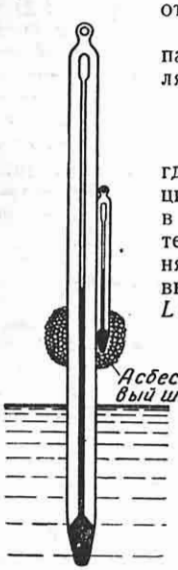
4) на положение термометра;

этими двумя поправками в силу их малости можно пренебречь;

5) на термическую инертность; эта поправка имеет заметную величину лишь при относительно быстрых изменениях температуры;

6) на смещение точки нуля из-за термического гистерезиса стекла; эта поправка определяется проверкой точки 0° С до и после измерения (берется средний результат);

7) поправка на выступающий столбик ртути, имеющий температуру, отличную от измеряемой.



Фиг. 1. Расположение термометров при внесении поправки на выступающий столбик.

Поправка на выступающий столбик определяется по формуле

$$\Delta t = a\,(t - t_1)\,L,$$

где a — видимый коэффициент расширения ртути в стекле; t — измеряемая температура; t_1 — средняя температура ртути в выступающем столбике; L — длина выступающего столбика, выраженная в градусах шкалы термометра.

Пример введения поправок. Ртутный термометр погружен до деления 120° С и показывает t=170° С. Средняя температура выступающего столбика, определяемая вспомогательным термометром (фиг. 1), равна t_1=54°С. Смещение нулевой точки перед измерением равно + 0,1° С и после измерения + 0,06° С. Термометр изготовлен из иенского стекла.

Определим поправку на выступающий столбик:

$$\Delta t = a\,(t - t_1)\,L =$$

$$= 0{,}000164\,(170 - 54)\,(170 - 120) = 0{,}95°\text{ С}.$$

Поправка по имеющемуся свидетельству для температуры $170 + \Delta t = 170 + 0{,}95 = 170{,}95°$ С имеет величину −0,95° С и относится к положению нуля −0,05° С. Изменение положения нулевой точки составит $-0{,}05 - \left[\frac{+0{,}1 + (+0{,}06)}{2}\right] =$ $= -0{,}13°$ С.

Новая поправка с учетом смещения нулевой точки при температуре 170,95° С теперь составит $-0{,}25 + (-0{,}13) = -0{,}38°$ С. Таким образом, действительная температура будет равна

$$t = 170{,}95 + (-0{,}38) = 170{,}57°\text{ С}.$$

Температуру тела, измеренную посредством термометрического устройства с реальным термометрическим веществом, называют эмпирической температурой в отличие от так называемой термодинамической температуры.

Термодинамическая шкала температур основана на втором законе термодинамики и не зависит от свойств термометрического вещества.

Температуры по термодинамической шкале отсчитываются от температуры абсолютного нуля и обозначаются Т° абс. или °К.

Абсолютная температура тождественна с термодинамической температурой. При температуре абсолютного нуля тепловое движение молекул прекращается. Из самого определения ее следует, что абсолютная температура Т° всегда положительна.

Абсолютная температура тела может быть измерена с помощью термометрического устройства, в котором в качестве термометрического вещества взят сильно разреженный или идеальный газ, т. е. с помощью газового термометра, наполненного сильно разреженным газом, например: водородом, азотом, гелием.

Объем, занимаемый таким разреженным газом, и его давление прямо пропорциональны его абсолютной температуре, так что идеально газовая температурная шкала является шкалой абсолютной температуры.

Международная температурная шкала

Международная температурная шкала принятая VIII генеральной конференцией по мерам и весам в 1933 году и введенная в СССР общесоюзным стандартом (ОСТ ВКС 6954) является практическим осуществлением термодинамической стоградусной температурной шкалы, у которой температура плавления льда и температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении обозначены соответственно 0° и 100°.

Международная температурная шкала основывается на системе постоянных, точно воспроизводимых температур равновесия (постоянных точек), которым присвоены числовые значения. Для определения промежуточных температур служат интерполяционные приборы, градуированные по этим постоянным точкам.

Таблица 1

Основные постоянные точки температурной шкалы [12]

Наименование вещества	Обозначение вещества	Условие равновесия	Температура в °С	Связь между температурой и давлением от $p = 680$ до 780 *мм* рт. ст.
Кислород . . .	O_2	Кипение	−182,97	$t = t_{760} + 0{,}0126\,(p - 760) - 0{,}0000065\,(p - 760)^2$
Лед	H_2O	Плавление	0,000	
Вода	H_2O	Кипение	100,000	$t = t_{760} + 0{,}0367\,(p - 760) - 0{,}000023\,(p - 760)^2$
Сера	S	Кипение	444,60	$t = t_{760} + 0{,}0909\,(p - 760) - 0{,}000048\,(p - 760)^2$
Серебро	Ag	Затвердевание	960,5	
Золото	Au	Затвердевание	1063,0	

Температура, измеряемая по международной шкале, обозначается °С.

Абсолютная температура и температура по стоградусной шкале связаны соотношением $T° \text{ абс} = t° C + 273{,}16°$, откуда следует, что абсолютный нуль температуры равен — 273,16° стоградусной шкалы.

В табл. 1 даны основные постоянные точки международной температурной стоградусной шкалы, а в табл. 2 и 3 — другие часто употребляемые постоянные точки, которыми пользуются при проверке и градуировке соответствующих термодинамических приборов, а также при получении вполне определенных температур.

В табл. 4 дана поправка Δt для перехода от показаний газовых термометров постоянного объема к термодинамической шкале для нормальных термометров.

В табл. 5, 6 и 7 приведены шкалы термометров.

В табл. 8 приведены допустимые погрешности показаний лабораторных и технических термометров.

Воспроизведение и поддержание в СССР международной шкалы температур осуществляет ВНИИМ.

Для передачи правильного значения величины градуса в различных областях температур от шкалы к рабочим измерителям температуры существует система образцовых приборов.

Таблица 2

Вспомогательные постоянные точки температурной шкалы [12]

Наименование вещества	Обозначение вещества	Условие равновесия	Температура в °С	Наименование вещества	Обозначение вещества	Условие равновесия	Температура в °С
Этиловый эфир	$C_2H_5 \cdot O \cdot C_2H_5$	Затвердевание	−123,6	Хлористый марганец	$MnCl_2 \cdot 2H_2O$	То же	+50,09
Сероуглерод	CS_2	То же	−112,0	Нафталин	$C_{10}H_8$	Кипение	+217,96
Углекислота	CO_2	Сублимация	−78,52	Олово	Sn	Затвердевание	+231,85
Хлороформ	$CHCl_3$	Затвердевание	−63,7	Бензофенон	$C_6H_5 \cdot CO \cdot C_6H_5$	Кипение	+305,9
Хлорбензол	C_6H_5Cl	То же	−45,5	Кадмий	Cd	Затвердевание	+320,9
Ртуть	Hg	»	−38,87	Цинк	Zn	То же	+419,45
Сернокислый натрий	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	Точка перехода	−32,38	Сурьма	Sb	»	+630,5
				Медь	Cu	»	+1083
				Палладий	Pd	»	+1555
				Вольфрам	W	Плавление	+3400

Таблица 3

Употребительные постоянные точки температурной шкалы в области весьма низких температур [12]

Наименование вещества	Обозначение вещества	Условие равновесия	Температура в °К	Связь между температурой и давлением
Азот	N_2	Кипение	77,35	От 760 до 150 *мм* рт. ст.: $\lg p = 7{,}781845 - 0{,}0062649 \cdot T - \frac{341{,}619}{T}$
Водород	H_2	Кипение	20,38	От 760 до 54 *мм* рт. ст.: $\lg p = 4{,}80204 + 0{,}0167335\ T - \frac{46{,}1045}{T}$
Гелий	He	Кипение	4,22	От 760 до 0,3 *мм* рт. ст.: для $T > 2{,}19°$ К: $\lg p = -\frac{3{,}024}{T} + 2{,}208 \lg T + 1{,}217$; для $T < 2{,}19°$ К: $\lg p = -\frac{3{,}018}{T} + 2{,}484 \lg T - 0{,}00297 \times T^4 - 1{,}197$

Таблица 4

Поправка Δt для перехода от показаний газовых термометров постоянного объема к термодинамической шкале для нормальных термометров при $p = 1000$ *мм* рт. ст. для 0° С [12]

t,° С	He	H_2	N_2	t,° С	He	H_2	N_2
+450	0,061	—	0,190	— 80	0,004	0,005	0,033
+400	0,016	—	0,150	— 90	0,005	0,007	0,042
+350	0,034	—	0,110	—100	0,006	0,009	0,052
+300	0,023	—	0,080	—110	0,007	0,011	0,064
+250	0,015	0,032	0,050	—120	0,008	0,013	0,077
+200	0,008	0,017	0,027	—130	0,009	0,016	—
+150	0,003	0,007	0,011	—140	0,011	0,019	—
+100	0,000	0,000	0,000	—150	0,013	0,022	—
+ 75	—0,001	—0,001	—0,002	—160	0,015	0,026	—
+ 50	—0,001	—0,003	—0,004	—170	0,017	0,030	—
+ 25	—0,001	—0,001	—0,002	—180	0,019	0,035	—
0	0,000	0,000	0,000	—190	0,021	0,040	—
—10	0,000	0,000	0,002	—200	0,024	0,046	—
—20	0,001	0,001	0,004	—210	0,027	0,053	—
—30	0,001	0,001	0,007	—220	0,030	0,062	—
—40	0,002	0,002	0,011	—230	0,033	0,072	—
—50	0,002	0,002	0,015	—240	0,037	0,083	—
—60	0,003	0,003	0,020	—250	0,041	0,100	—
—70	0,003	0,004	0,025	—260	0,045	—	—

Примечания: 1. Действительная температура, соответствующая термодинамической шкале, равна

$$t = t_{газ} + \Delta t.$$

2. Газовые термометры могут быть применены в широком диапазоне температур: от —270 до 1500° С и выше.

Таблица 5

Шкалы образцовых термометров [11]

Основная шкала в °С		Вспомогательная шкала в °С		Цена деления в °С	Допускаемые погрешности по градуировке шкалы в °С
От	До	От	До		
— 30	+ 25	—	—	0,1	±0,3
— 2	+ 52	—	—	0,1	±0,2
+ 48	+102	—1	+1	0,1	±0,2
+ 98	+202	—1	+1	0,2	±0,4
+198	+302	—1	+1	0,2	±0,8

Таблица 6

Шкалы лабораторных термометров [11]

Пределы шкалы в °С	Цена деления в °С	Общая длина в *мм* (допуск ±10 *мм*)	
		палочных	с вложенной шкалой
0 ÷ 100	1	220	220
0 ÷ 150	1	220	250
0 ÷ 250	1	280	300
0 ÷ 350	1	320	350
0 ÷ 400	1	—	—
0 ÷ 500	1	—	—

Таблица 7

Шкалы технических термометров [11]

Пределы шкалы в °С	Цена деления в °С	Пределы шкалы в °С	Цена деления в °С
0 ÷ 50	0,5 или 1	0 ÷ 300	2
0 ÷ 100	0,5 или 1	0 ÷ 350	2
0 ÷ 150	1	0 ÷ 400	2 или 5
0 ÷ 200	1 или 2	0 ÷ 450	5
0 ÷ 250	2	0 ÷ 500	5 или 10

Таблица 8

Допустимые погрешности показаний лабораторных и технических термометров [11]

Температурные интервалы в °С		Допустимая погрешность при цене деления в °С				
От	До	0,1 и 0,2	0,5	1	2	5 и 10
− 30	0	±0,3	±1	∓1	∓2	± 5
+ 1	+100	±0,2	±1	∓1	∓2	± 5
+101	+200	±0,4	∓1	∓1	∓2	± 5
+201	+300	±1,0	±2	∓1	∓4	±10
+301	+400	—	—	∓3	∓4	±10
+401	+500	—	—	∓4	∓5	±10

ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Принцип действия основан на изменении электрического сопротивления термометрического тела с изменением температуры.

В качестве термометрического вещества применяются главным образом чистые металлы и в первую очередь платина как вещество, наиболее отвечающее всем требованиям термометрического материала: химическая стойкость, значительный температурный коэффициент электросопротивления, сравнительно простая закономерность зависимости электросопротивления от температуры, воспроизводимость с неизменными свойствами.

Сорт платины для термометров сопротивления должен быть таким, чтобы величина $\frac{R_{100}}{R_0}$ была не менее 1,390, а величина $\frac{R_{444,6}}{R_0}$ не менее 2,645, где R_0, R_{100} и $R_{444,6}$ — сопротивление термометра соответственно при температурах плавления льда, кипения воды и кипения серы.

Для интервала температур от −30° С до +660° С зависимость сопротивления чистой платины от температуры определяется уравнением

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2), \qquad (1)$$

где R_0 — сопротивление платины при температуре плавления льда (0° С); t — температура по стоградусной шкале; a, b — постоянные для данного сорта платины, определяемые градуировкой термометра при температурах плавления льда (0° С), кипения воды (100° С) и кипения серы (444,6° С).

Обычно $a = 3{,}94 \cdot 10^{-3}$, $b = -5{,}8 \cdot 10^{-7}$; однако в зависимости от сорта платины их значения несколько меняются.

Для температур от 0° до −190° С следует пользоваться уравнением

$$R_t = R_0 [1 + at + bt^2 + c\,(t - 100)\,t^3], \qquad (2)$$

где R_0, a, b — те же коэффициенты, что и в уравнении (1), а коэффициент c может быть определен дополнительной градуировкой термометра при температуре кипения кислорода, равной — 182,97° С.

При работе в этой области температур сорт платины должен удовлетворять требованию

$$\frac{R_{-182,97}}{R_0} \leqslant 0{,}25.$$

В качестве термометрических материалов для термометров сопротивления используются медь (при температурах до 100—150° С), никель (до 200—250° С), железо (до 100—150° С), свинец (при низких температурах) и фосфористая бронза (в области сверхнизких температур).

Табл. 9 и 10 дают возможность сразу определить измеряемую температуру по известным сопротивлениям термометра R_0 и R_t соответственно при 0° С и при измеряемой температуре t° С, не прибегая к расчету по уравнению (1) или (2).

При работе с термометрами сопротивления ошибки вызываются:

1) изменением сопротивления термометрического материала из-за механического или химического воздействия;

Таблица 9

Отношения $\frac{R_t}{R_0}$ платины для температур от 0 до 500° С [12]

t° С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\frac{\Delta\left(\frac{R_t}{R_0}\right)}{\Delta t}\,10^5$
0	1,00000	1,00397	1,00794	1,01191	1,01588	1,01985	1,02381	1,02778	1,03174	1,03570	397
10	1,03966	1,04362	1,04758	1,05154	1,05550	1,05945	1,06341	1,06736	1,07131	1,07526	396
20	1,07921	1,08316	1,08711	1,09106	1,09500	1,09894	1,10289	1,10683	1,11077	1,11471	394
30	1,11855	1,12258	1,12652	1,13045	1,13438	1,13832	1,14225	1,14618	1,15011	1,15403	393
40	1,15796	1,16189	1,16581	1,16973	1,17365	1,17757	1,18149	1,18541	1,18933	1,19325	392
50	1,19716	1,20107	1,20499	1,20890	1,21281	1,21672	1,22062	1,22453	1,22844	1,23234	391
60	1,23624	1,24014	1,24404	1,24794	1,25184	1,25574	1,25964	1,26353	1,26742	1,27132	390
70	1,27521	1,27910	1,28299	1,28688	1,29076	1,29465	1,29853	1,30242	1,30630	1,31018	389
80	1,31406	1,31794	1,32182	1,32569	1,32957	1,33341	1,33731	1,34119	1,34506	1,34892	387
90	1,35279	1,35666	1,36053	1,36439	1,36826	1,37212	1,37598	1,37984	1,38370	1,38755	386
100	1,39141	1,39527	1,39912	1,40297	1,40682	1,41068	1,41453	1,41837	1,42222	1,42607	385
110	1,42991	1,43376	1,43760	1,44144	1,44528	1,44912	1,45296	1,45679	1,46063	1,46446	384
120	1,46830	1,47218	1,47596	1,47979	1,48362	1,48745	1,49127	1,49510	1,49892	1,50274	383
130	1,50656	1,51038	1,51420	1,51802	1,52184	1,52565	1,52947	1,53328	1,53709	1,54090	382
140	1,54471	1,54852	1,55233	1,55614	1,55994	1,56375	1,56755	1,57135	1,57515	1,57895	380
150	1,58275	1,58655	1,59034	1,59414	1,59793	1,60172	1,60551	1,60930	1,61309	1,61688	379
160	1,62067	1,62445	1,62824	1,63202	1,63580	1,63958	1,64336	1,64714	1,65092	1,65470	378
170	1,65847	1,66225	1,66602	1,66979	1,67356	1,67733	1,68110	1,68486	1,68863	1,69239	377
180	1,69616	1,69992	1,70368	1,70744	1,71120	1,71496	1,71871	1,72247	1,72622	1,72997	376
190	1,73373	1,73748	1,74123	1,74497	1,74872	1,75247	1,75621	1,75995	1,76370	1,76744	375
200	1,77118	1,77492	1,77866	1,78239	1,78613	1,78986	1,79359	1,79733	1,80106	1,80479	373
210	1,80852	1,81224	1,81597	1,81969	1,82342	1,82714	1,83086	1,83458	1,83830	1,84202	372
220	1,84574	1,84945	1,85317	1,85688	1,86059	1,86430	1,86801	1,87172	1,87543	1,87914	371
230	1,88284	1,88655	1,89025	1,89395	1,89765	1,90135	1,90505	1,90874	1,91244	1,91614	370
240	1,91983	1,92352	1,92721	1,93090	1,93459	1,93828	1,94197	1,94565	1,94933	1,95302	369
250	1,95670	1,96038	1,96406	1,96774	1,97141	1,97509	1,97876	1,98244	1,98611	1,98978	368
260	1,99345	1,99712	2,00079	2,00446	2,00812	2,01179	2,01545	2,01911	2,02277	2,02643	366
270	2,03009	2,03375	2,03741	2,04106	2,04472	2,04837	2,05202	2,05567	2,05932	2,06297	365
280	2,06661	2,07026	2,07391	2,07755	2,08119	2,08483	2,08847	2,09211	2,09575	2,09938	364
290	2,10302	2,10665	2,11029	2,11392	2,11755	2,12118	2,12481	2,12843	2,13206	2,13568	363
300	2,13931	2,14293	2,14655	2,15070	2,15379	2,15749	2,16103	2,16464	2,16826	2,17187	362
310	2,17548	2,17909	2,18270	2,18631	2,18992	2,19352	2,19713	2,20073	2,20434	2,20794	361
320	2,21154	2,21514	2,21873	2,22233	2,22593	2,22952	2,23312	2,23671	2,24030	2,24389	359
330	2,24748	2,25106	2,25465	2,25824	2,26182	2,26540	2,26893	2,27257	2,27615	2,27972	358
340	2,28330	2,28688	2,29045	2,29403	2,29760	2,30117	2,30474	2,30831	2,31188	2,31544	357
350	2,31901	2,32257	2,32613	2,32970	2,33326	2,33682	2,34038	2,34393	2,34749	2,35104	356
360	2,35460	2,35815	2,36170	2,36525	2,36880	2,37235	2,37590	2,37944	2,38299	2,38653	355
370	2,39007	2,39361	2,39715	2,40069	2,40423	2,40777	2,41130	2,41484	2,41837	2,42190	354
380	2,42543	2,42896	2,43249	2,43601	2,43954	2,44307	2,44659	2,45011	2,45363	2,45715	352
390	2,46067	2,46419	2,46771	2,47122	2,47474	2,47825	2,48176	2,48527	2,48878	2,49229	351
400	2,49580	2,49930	2,50281	2,50631	2,50982	2,51332	2,51682	2,52032	2,52381	2,52731	350
410	2,53081	2,53430	2,53779	2,54128	2,54478	2,54827	2,55175	2,55524	2,55873	2,56221	349
420	2,56570	2,56918	2,57266	2,57614	2,57962	2,58310	2,58658	2,59005	2,59353	2,59700	348
430	2,60047	2,60395	2,60742	2,61038	2,61435	2,61782	2,62129	2,62475	2,62821	2,63167	347
440	2,63513	2,63859	2,64205	2,64551	2,64895	2,65242	2,65537	2,65933	2,66278	2,66623	346
450	2,66968	2,67312	2,67657	2,68002	2,68346	2,68690	2,69034	2,69379	2,69723	2,70067	344
460	2,70410	2,70754	2,71097	2,71441	2,71784	2,72127	2,72470	2,72813	2,73156	2,73499	343
470	2,73841	2,74184	2,74526	2,74868	2,75210	2,75552	2,75894	2,76236	2,76578	2,76919	342
480	2,77261	2,77602	2,77943	2,78284	2,78625	2,78936	2,79307	2,79647	2,79988	2,80328	341
490	2,80668	2,81009	2,81349	2,81688	2,82028	2,82368	2,82708	2,83047	2,83386	2,83725	340

Таблица 10

Отношение $\frac{R_t}{R_0}$ платины и свинца для температур от 0 до —193° С [12]

— t° С	Pt	Pb	— t° С	Pt	Pb	— t° С	Pt	Pb
0	1,00000	1,0000	65	0,73919	0,7416	130	0,47176	0,4932
1	0,99602	0,9959	66	0,73513	0,7377	131	0,46758	0,4894
2	0,99204	0,9919	67	0,73107	0,7339	132	0,46340	0,4857
3	0,98806	0,9878	68	0,72701	0,7300	133	0,45921	0,4819
4	0,98408	0,9838	69	0,72295	0,7261	134	0,45502	0,4782
5	0,98010	0,9797	70	0,71888	0,7222	135	0,45083	0,4744
6	0,97612	0,9757	71	0,71481	0,7184	136	0,44663	0,4706
7	0,97214	0,9717	72	0,71074	0,7145	137	0,44243	0,4669
8	0,96816	0,9676	73	0,70667	0,7106	138	0,43823	0,4631
9	0,96418	0,9636	74	0,70260	0,7068	139	0,43403	0,4594
10	0,96020	0,9596	75	0,69853	0,7029	140	0,42982	0,4556
11	0,95622	0,9555	76	0,69445	0,6991	141	0,42561	0,4519
12	0,95224	0,9515	77	0,69037	0,6952	142	0,42140	0,4481
13	0,94826	0,9475	78	0,68629	0,6913	143	0,41718	0,4444
14	0,94427	0,9434	79	0,68221	0,6875	144	0,41295	0,4406
15	0,94028	0,9394	80	0,67813	0,6836	145	0,40872	0,4369
16	0,93629	0,9354	81	0,67404	0,6798	146	0,40449	0,4332
17	0,93230	0,9314	82	0,66995	0,6759	147	0,40026	0,4294
18	0,92831	0,9274	83	0,66586	0,6721	148	0,39603	0,4257
19	0,92432	0,9234	84	0,66177	0,6682	149	0,39179	0,4220
20	0,92033	0,9193	85	0,65768	0,6644	150	0,38755	0,4182
21	0,91633	0,9153	86	0,65359	0,6605	151	0,38330	0,4145
22	0,91233	0,9113	87	0,64949	0,6567	152	0,37905	0,4108
23	0,90833	0,9073	88	0,64540	0,6529	153	0,37480	0,4071
24	0,90433	0,9033	89	0,64131	0,6490	154	0,37055	0,4033
25	0,90033	0,8993	90	0,63721	0,6452	155	0,36629	0,3996
26	0,89633	0,8953	91	0,63311	0,6414	156	0,36203	0,3959
27	0,89233	0,8913	92	0,62901	0,6376	157	0,35777	0,3922
28	0,88833	0,8874	93	0,62491	0,6337	158	0,35351	0,3885
29	0,88432	0,8834	94	0,62080	0,6299	159	0,34925	0,3848
30	0,88031	0,8794	95	0,61669	0,6261	160	0,34498	0,3810
31	0,87630	0,8754	96	0,61258	0,6223	161	0,34071	0,3773
32	0,87229	0,8714	97	0,60846	0,6185	162	0,33644	0,3736
33	0,86828	0,8675	98	0,60434	0,6146	163	0,33216	0,3699
34	0,86427	0,8635	99	0,60022	0,6108	164	0,32788	0,3662
35	0,86026	0,8595	100	0,59610	0,6070	165	0,32360	0,3625
36	0,85625	0,8555	101	0,59198	0,6032	166	0,31932	0,3588
37	0,85224	0,8516	102	0,58786	0,5994	167	0,31503	0,3551
38	0,84823	0,8476	103	0,58374	0,5956	168	0,31074	0,3514
39	0,84421	0,8436	104	0,57962	0,5918	169	0,30645	0,3477
40	0,84019	0,8397	105	0,57550	0,5879	170	0,30216	0,3440
41	0,83617	0,8357	106	0,57138	0,5841	171	0,29787	0,3403
42	0,83214	0,8318	107	0,56726	0,5803	172	0,29358	0,3366
43	0,82811	0,8278	108	0,56313	0,5765	173	0,28929	0,3330
44	0,82408	0,8234	109	0,55900	0,5727	174	0,28500	0,3293
45	0,82005	0,8199	110	0,55487	0,5689	175	0,28070	0,3256
46	0,81602	0,8160	111	0,55073	0,5651	176	0,27640	0,3219
47	0,81198	0,8120	112	0,54659	0,5613	177	0,27210	0,3182
48	0,80795	0,8081	113	0,54245	0,5575	178	0,26779	0,3545
49	0,80392	0,8042	114	0,53831	0,5537	179	0,26348	0,3109
50	0,79989	0,8002	115	0,53417	0,5499	180	0,25917	0,3072
51	0,79586	0,7963	116	0,53003	0,5461	181	0,25486	0,3035
52	0,79182	0,7924	117	0,52589	0,5424	182	0,25055	0,2999
53	0,78778	0,7885	118	0,52174	0,5386	183	0,24624	0,2962
54	0,78374	0,7845	119	0,51759	0,5348	184	0,24192	0,2925
55	0,77970	0,7806	120	0,51344	0,5310	185	0,23760	0,2889
56	0,77566	0,7767	121	0,50929	0,5272	186	0,23328	0,2852
57	0,77161	0,7728	122	0,50513	0,5234	187	0,22895	0,2816
58	0,76756	0,7689	123	0,50097	0,5196	188	0,22462	0,2779
59	0,76352	0,7650	124	0,49680	0,5159	189	0,22029	0,2742
60	0,75947	0,7611	125	0,49263	0,5121	190	0,21595	0,2706
61	0,75542	0,7572	126	0,48846	0,5083	191	0,21161	0,2669
62	0,75137	0,7533	127	0,48429	0,5045	192	0,20727	0,2633
63	0,74731	0,7494	128	0,48012	0,5008	193	0,20292	0,2596
64	0,74325	0,7455	129	0,47594	0,4970			

2) влиянием сопротивления подводящих проводов;

3) тепловым эффектом измерительных токов;

4) появлением термоэлектродвижущей силы в цепи термометра;

5) термической инертностью.

Примечания: 1. Платиновые термометры сопротивления могут быть применены не только до 660° С, но и выше (до 1000°); в подобных случаях термометры сопротивления следует выполнять из сравнительно толстой проволоки (диаметром 0,5—0,6 *мм*).

2. Точность платиновых термометров сопротивления может быть достигнута 0,001° С при измерениях от 0 до 100° С; 0,01° С в интервале от 100 до 500° С, а при температурах 1000° С — не выше 0,1—0,2° С. Обычно легко достигается точность термометров сопротивления в интервале от — 190 до 660° С порядка 0,02—0,08° С.

ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ (ТЕРМОПАРЫ)

Принцип действия основан на возникновении электродвижущей силы (э. д. с.) в цепи термопары, спаи которой имеют разные температуры (фиг. 2).

Требования к материалам для проводников термопар:

1) физическая и химическая стойкость в диапазоне измеряемых температур;

2) минимальный температурный коэффициент электросопротивления при высокой электропроводности;

3) возможно большая термоэлектродвижущая сила, однозначно меняющаяся в зависимости от температуры;

4) воспроизводимость с неизменными свойствами;

5) возможность конструктивного осуществления термоэлемента.

По характеру применяемых материалов для изготовления термопар последние могут быть разбиты на следующие три группы:

1) термопары из благородных металлов;

2) термопары из неблагородных металлов;

3) термопары из металлических термоэлектродов в паре с неметаллами и химическими соединениями.

Для термопары платинородий-платина в интервале от 300 до 1300° С зависимость термо-электродвижущей силы от температуры достаточно точно выражается формулой

$$E = a + bt + ct^2,$$

где a, b и c — константы, определяемые по температурам затвердевания сурьмы (630,5° С), серебра (960,5° С) и золота (1063,0° С).

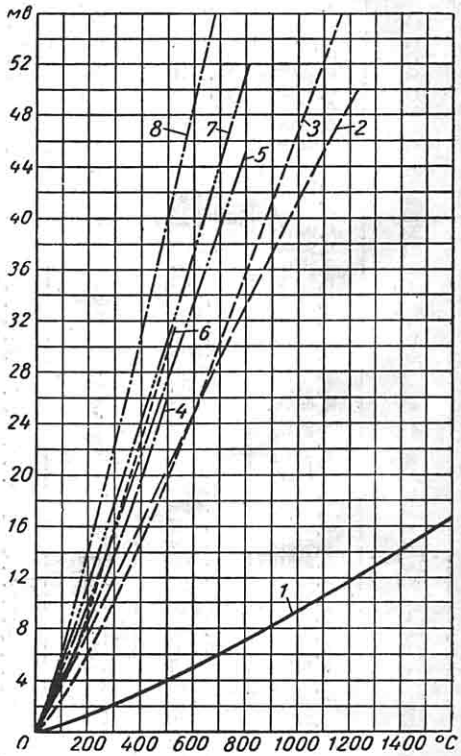
Для чистых платины и платинородия

$$a = -0{,}3702;\ b = 8{,}38 \cdot 10^{-3};$$

$$c = 1{,}57 \cdot 10^{-6}.$$

Примечания: 1. Градуировку и проверку термопар производят или по постоянным точкам плавления и кипения химически чистых веществ, или путем сличения с образцовым прибором.

2. Точность измерения температур термоэлементами существенно зависит от качества материала термопары, точности ее градуировки и от применяемого показывающего электроизмерительного прибора и в лучшем случае может достигать величины 0,02%



Фиг. 2. Зависимость термоэлектродвижущих сил от температуры; *1* — платинородий-платина; *2* — хромель-алюмель; *3* — платинородий-платина — золото-палладий; *4* — медь-константан; *5* — железо-константан; *6* — медь-копель; *7* — железо-копель; *8* — хромель-копель.

Термоэлектродвижущая сила различных проводниковых материалов в паре с химически чистой платиной дана в табл. 11.

Таблица 11

Термоэлектродвижущая сила различных проводниковых материалов в паре с химически чистой платиной при $t = 100°$ С и $t_0 = 0°$ С и их температуры плавления [12]

Наименование материала проводника	Обозначение или состав	Термо-э. д. с. в *мв*	Температура применения в °С		Температура плавления в °С
			длительная	кратковременная	
Алюминий	Al	+0,40			658
Алюмель	95% Ni + +5% (Al, Si, Mg)	−1,02 ÷ −1,38	1000	1 250	1 450
Висмут	Bi	−5,84 ÷ −7,30			271,5
Вольфрам	W	+0,79	2000	2500	3400
Железо химически чистое	Fe	+1,80	600	800	1530
Железо поделочное	Fe	+1,87	600	800	1400
Золото	Au	+0,80	800	900	1063
Иридий	Ir	+0,65	1200	1800	2350
Константан	60% Cu + + 40% Ni	−3,5	600	800	1250
Копель	56% Cu + + 44% Ni	−4,0	600	800	1250
Кремний	Si	+44,8			1420
Кадмий	Cd	+0,90			321
Кобальт	Co	−1,68 ÷ −1,76			1490
Молибден	Mo	+1,31	2000	2300	2622
Медь химически чистая	Cu	+0,76	350	500	1083
Медь проводниковая	Cu	+0,75	350	500	
Манганин	84% Cu + + 13% Mn + + 2% Ni + + 1% Fe	+0,8			910
Магний	Mg	+0,41			659
Нихром	80% Ni + + 20% Cr	+1,5 ÷ +2,5	1000	1100	1500
Никель	Ni	−1,50 ÷ −1,54	800	1100	1452
Олово	Sn	+0,43			232
Платина „экстра"	Pt	0,000	1300	1600	1770
Платинородий	90% Pt + + 10% Rh	+0,64	1300	1600	
Платиноиридий	90% Pt + + 10% Ir	+1,3	1000	1200	
Палладий	Pd	−0,57			1555
Пирит	FeS_2	+12,1			
Родий	Rh	+0,64			1967
Ртуть	Hg	+0,04			−38,9
Сурьма	Sb	+4,86			630,5
Свинец	Pb	+0,44			327
Серебро	Ag	+0,72	600	700	960,5
Теллур	Te	+50,0			350
Тантал	Ta	+0,51			2800
Графит	C	+0,25	2000	2500	3570
Хромель	90% Ni + + 10% Cr	+2,71 ÷ +3,13	1000	1250	1450
Цинк	Zn	+0,7			419,4

ДАВЛЕНИЕ

Давление p, так же как и температура, является основной термодинамической величиной, или параметром, определяющим макроскопическое состояние тела.

Кинетическая теория материи связывает давление p находящегося в равновесии тела, например газа или жидкости, непосредственно со средней кинетической энергией теплового движения молекул тела и средним числом их в единице объема.

Согласно этой теории давление p является результатом ударов молекул об ограничивающие тело поверхности. Таким образом, с молекулярно-кинетической точки зрения давление p, равно как и температура T, являются статистическими величинами, характеризующими свойства макроскопических тел. Давление численно равно силе, действующей на единицу площади поверх-

ности тела перпендикулярно последней. Давление измеряется в различных единицах, из которых особенно часто применяются технические атмосферы, физические атмосферы, миллиметры ртутного столба, миллиметры и метры водяного столба. Давление измеряется с помощью барометров, манометров и вакуумметров, устройство которых основывается на уравновешивании усилий, передающихся от тела, давление которого измеряется, весом столба жидкости или деформацией различного рода пружин, а также нагрузкой на поршень.

В соответствии с определением давления и в зависимости от принятых в данной системе единиц измерения силы и площади давление может измеряться в различных единицах.

В таблице на стр. 543 I тома приведены единицы измерения давления и соотношения между ними.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Приборы, служащие для измерения давления, классифицируют по следующим основным признакам:

1) по роду измеряемого давления (барометры, манометры, микроманометры, вакуумметры, тягомеры);

2) по принципу действия (жидкостные, поршневые, пружинные, электрические, комбинированные);

3) по степени точности и области применения (рабочие, контрольные, образцовые).

Примечания. При эксплуатации приборов для измерения давления пользуются следующими способами поверки:

1. Способ поверки нулевой точки — стрелка отсоединенного от системы прибора должна становиться на ноль шкалы.

2. Способ поверки прибора в рабочей точке — сличение с показанием контрольного прибора в рабочей точке.

3. Способ полной поверки — сличение с образцовым прибором во всем диапазоне давлений.

Жидкостные приборы

Жидкостные приборы применяются для измерения давлений от нескольких *мм* вод. ст. до 2—3 *кГ/см*^{2}.

Наиболее простым и распространенным прибором для измерения давления является U-образный манометр, один конец которого подсоединяется к сосуду, в котором нужно измерить давление, а другой сообщается с атмосферой (фиг. 3).

Измеряемое давление p равно

$$p = B + h \cdot \gamma,$$

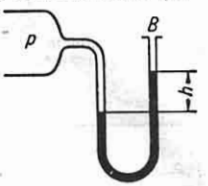
где B — барометрическое (атмосферное) давление; h — разность уровней жидкости в манометре; γ — удельный вес жидкости, заполняющей манометр.

Давление p является абсолютным (отсчитываемым от нуля) давлением.

Разность между абсолютным давлением p и барометрическим B называется избыточным давлением $p_{изб}$.

Таким образом

$$p_{изб} = p - B = h\gamma.$$



Фиг. 3. Жидкостный манометр.

Рабочей жидкостью U-образного манометра может быть ртуть, вода, спирт.

Примечания. При точных измерениях необходимо вводить поправки:

1) на изменение удельного веса манометрической жидкости и изменение длины шкалы с температурой, т. е. привести показания к 0° С:

$$h_0 = h_t - (\beta - \alpha) \cdot h_t \cdot t = h_t [1 - (\beta - \alpha) t],$$

где h_0 — разность уровней жидкости, приведенная к 0° С; h_t — разность уровней жидкости при температуре t; β — коэффициент объемного расширения манометрической жидкости; α — коэффициент линейного расширения шкалы; тогда давление, приведенное к нормальной температуре, будет

$$p = h_0 \cdot \gamma_0 + B = [1 - (\beta - \alpha) t] h_t \cdot \gamma_0 + B;$$

если манометрической жидкостью является вода, то удельный вес приводят не к 0, а к 4° С, так как $\gamma_{воды} = 1000$ *кГ/м*^{3} при 4° С;

2) на изменение удельного веса манометрической жидкости с географической широтой и высотой над уровнем моря:

$$p = h_0 \cdot \gamma_0 \frac{g_\varphi}{g} + B,$$

где g — ускорение силы тяжести на широте 45° и уровне моря, равное 9,80665 *м/сек*^{2}; g_φ — ускорение силы тяжести на широте φ и высоте над уровнем моря H; g_φ можно определить по формуле

$$g_\varphi = g (1 - 0{,}026 \cdot \cos 2\varphi - 2 \cdot 10^{-7} \cdot H).$$

Следовательно,

$$p = h_0 \cdot \gamma_0 (1 - 0{,}026 \cdot \cos 2\varphi - 2 \cdot 10^{-7} H) + B.$$

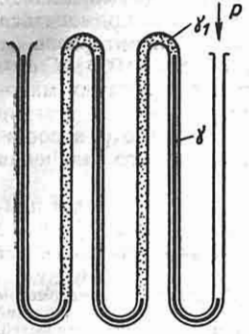
Кроме того, следует иметь в виду, что возможны ошибки измерения из-за неодинаковости внутренних диаметров левой и правой трубок манометра по всей длине. Для учета этой погрешности производят калибровку трубок.

Для измерения относительно больших давлений жидкостные манометры приобретают большую (часто неприемлемую) высоту. В этом случае вопрос измерения решается применением манометра Д. И. Менделеева, представляющего собой ряд последовательно соединенных трубок, наполовину заполненных ртутью, над которой находится вода

(фиг. 4). Измеряемое давление Δp при этом определяется по формуле:

$$\Delta p = \Sigma h \cdot \gamma - \Sigma h \cdot \gamma_1 = \Sigma h (\gamma - \gamma_1),$$

где Σh — сумма разностей уровней ртути в каждой паре трубок; γ и γ_1 — удельные веса ртути и воды.

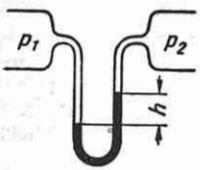


Фиг. 4. Схема манометра Д. И. Менделеева.

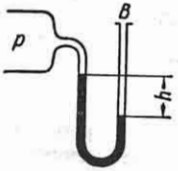
Часто U-образная трубка используется как дифференциальный манометр, измеряющий разность (перепад) давлений. Для этого один конец манометра присоединяют к сосуду с давлением p_1, а другой к сосуду с давлением p_2 (фиг. 5). Измеряемая при этом разность давлений равна

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \cdot \gamma.$$

Измерение вакуума производится вакуумметром, который по своей конструкции ничем не отличается от U-образного манометра (фиг. 6).



Фиг. 5. Жидкостный дифманометр.



Фиг. 6. Жидкостный вакуумметр.

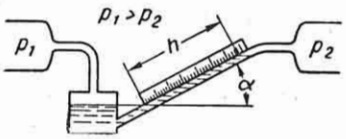
Измеряемый вакуум W равен

$$W = B - p = h \cdot \gamma,$$

а относительный вакуум w составляет

$$w = \frac{W}{B} \cdot 100\% = \frac{h \cdot \gamma}{B} \cdot 100\%.$$

При измерениях малых разностей давлений и малых вакуумов применяют микроманометры или микровакуумметры, представляющие собой наклонные манометрические трубки (фиг. 7).



Фиг. 7. Микроманометр.

Измеряемая величина определяется как

$$p_1 - p_2 = h \cdot \gamma \cdot \sin \alpha,$$

где α — угол наклона трубки к горизонту.

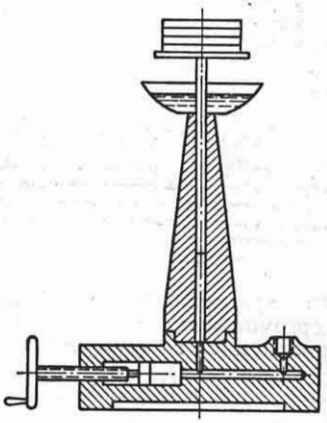
В качестве рабочей жидкости в вакуумметрах обычно применяют спирт, масло, ртуть.

Поршневые манометры

Поршневой манометр впервые был применен в 1883 г. Парротом и Ленцем в Петербурге.

Поршневые манометры отличаются наибольшей точностью (погрешность от $\pm$ 0,01 до 0,2%) в диапазоне давлений, где не могут быть использованы жидкостные манометры.

Область измеряемых давлений весьма широка: от 1 до 10 000 $кГ/см^2$ и выше.

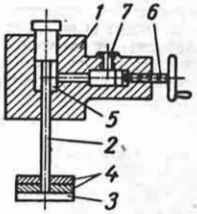


Фиг. 8. Простейший поршневой манометр.

Принцип действия поясняется фиг. 8, на которой представлен манометр с простым поршнем. Измеряемое давление определяется из выражения

$$p = \frac{G_1 + G_2}{f},$$

где G_1 — вес штока с тарелкой; G_2 — вес грузов; f — площадь сечения штока.



Фиг. 9. Поршневой манометр с дифференциальным поршнем: *1* — корпус прибора; *2* — шток; *3* — тарелка; *4* — грузы; *5* — камера прибора; *6* — винтовой пресс; *7* — отверстие для соединения прибора с объемом, в котором измеряется давление.

Для измерения высоких давлений применяют манометры с дифференциальным поршнем (фиг. 9).

Измеряемое давление

$$p = \frac{G_1 + G_2}{F - f},$$

где G_1 — вес штока с тарелкой; G_2 — вес грузов; F — площадь сечения верх-

ней части штока (большего диаметра); f — площадь сечения нижней части штока (меньшего диаметра). Для измерения очень больших давлений распространение получил манометр, в основу которого положен принцип гидравлического мультипликатора (фиг. 10).

Фиг. 10. Поршневой манометр Жоховского: *1* — корпус прибора; *2* — соединительная трубка; *3* — манометр предварительной оценки давления; *4* — поршень; *5* — шариковое сочленение; *6* — поршень; *7* — винтовой пресс; *8* — шток с тарелкой; *9* — грузы; *10* — шкив.

Измеряемое таким манометром давление определяется по формуле

$$p = \frac{G_1 + \frac{G_2 + G_3}{f_3} \cdot f_2}{f_1},$$

где G_1 — вес поршней *4* и *6*, шкива *10*, шарикового сочленения *5* и масла, находящегося над поршнем (весом масла часто можно пренебречь); G_2 — вес штока и тарелки *8*; G_3 — вес грузов *9*; f_1 — площадь сечения поршня *4* высокого давления; f_2 — площадь сечения поршня *6* низкого давления; f_3 — площадь сечения штока *8*.

Примечание. При точных измерениях давления поршневыми манометрами следует вводить поправки: 1) на изменение эффективной площади поршня от давления; 2) на ускорение силы тяжести; 3) на изменение эффективной площади поршня от температуры.

Пружинные манометры

Принцип действия пружинных манометров — деформация упругого элемента.

Пружинные манометры бывают трубчатые и пластинчатые (мембранные). Трубчатые манометры могут применяться для измерения давлений в интервале от десятков *мм* вод. ст. до 10 000 *кГ/см²*.

Точность образцовых трубчатых манометров для давлений до 2 *кГ/см²* и выше 500 *кГ/см²* и для вакуумметров составляет 0,35% от предельного значения шкалы манометра.

Пластинчатые манометры находят применение для измерения давлений от 0,2 до 30 *кГ/см²*. Точность их достигает 1—2%.

Примечание. Пластинчатые манометры широко применяются при измерениях давлений очень вязких и химически агрессивных жидкостей.

Электрические манометры

Действие электрических манометров основано на принципе изменения электрических свойств под воздействием давления. Сюда относятся:

1) манометры сопротивления, успешно применяемые при измерениях высоких и особенно сверхвысоких давлений;

2) пьезометрические манометры, хорошо работающие при измерениях быстроменяющихся давлений;

3) емкостные манометры, которые в отличие от мембранных имеют большую точность и могут измерять большие давления,

и ряд других электрических приборов.

Следует иметь в виду, что различные условия практики привели к созданию еще многих разновидностей приборов для измерения давления, нередко являющихся незаменимыми в тех или иных частных условиях. Классы точности и допустимая погрешность манометров приведены в табл. 12.

Таблица 12

Классы точности и допустимая погрешность манометров (по ГОСТ 2405-52)

Класс точности	0,005	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4
Допустимая погрешность в %	± 0,005	± 0,02	± 0,05	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1,0	± 1,5	± 2,5	± 4

Примечания: 1. Для манометров и вакуумметров образцовых допускается погрешность ±0,35%.
2. Согласно общим техническим условиям пружинные приборы разделяются на 5 классов: класс 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4 (ГОСТ 2405-52).
3. Для манометров, служащих для грубых измерений (определение наличия или отсутствия давления), допускается погрешность ± 10%.

УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ

Удельный объем v, так же как температура T и давление p, характеризует состояние тела.

Величина v представляет собой объем единицы веса данного вещества.

Размерность v: $м^3/кГ$.

Величина, обратная удельному объему, есть удельный вес γ и связана с v соотношением

$$\gamma = \frac{1}{v} \; кГ/м^3.$$

Методы экспериментального определения удельных объемов веществ

Для экспериментального определения удельных объемов веществ существует достаточно много методов: метод, основанный на взвешивании, метод пикнометра, метод реометра и много других; каждый из них может оказаться наиболее приемлемым в зависимости от агрегатного состояния исследуемого вещества, давления и температуры, при которых определяется удельный объем, и возможных условий постановки эксперимента.

Определение v твердых тел

1. Метод гидростатического взвешивания. Этот метод заключается в последовательном взвешивании образца твердого тела, удельный объем которого надо определить, в воздухе и в жидкости (для последней удельные объемы должны быть известны) с последующим приведением этих весов к пустоте. При точных опытах необходимо взвесить также и нить, на которой образец подвешивается к весам.

Тогда

$$v = \frac{V}{G} = \frac{V}{P + V\gamma_{вз}} = \frac{1}{\left(\frac{P}{P + P_н - P_1'}\right)(\gamma_ж - \gamma_{вз}) + \gamma_{вз}},$$

где V — объем образца тела, равный объему вытесненной жидкости и равный $\frac{P + P_н - P_1'}{\gamma_ж - \gamma_{вз}}$[1]; G — вес образца тела, приведенный к пустоте ($G = P + V \cdot \gamma_{вз}$); P — вес тела в воздухе; $P_н$ — вес нити, на которой подвешивается образец (при определении этого веса нить надо настолько же погрузить в жидкость, насколько она погружается при взвешивании образца); P_1' — вес тела и нити в жидкости; $\gamma_ж$ — удельный вес жидкости при условиях опыта; $\gamma_{вз}$ — удельный вес воздуха при температуре и барометрическом давлении опыта.

Этим методом можно достигнуть весьма высокой точности определения v: 0,001—0,0001%.

В качестве жидкости, применяемой в этом методе, лучше всего брать воду, для которой удельные веса известны с достаточно высокой точностью.

2. Метод пикнометра. При определении v этим методом расчет производят по формуле

$$v = \frac{V}{G} = \frac{V}{P + V \cdot \gamma_{вз}} = \frac{1}{\left(\frac{P}{P + P_1 - P_2}\right)(\gamma_ж - \gamma_{вз}) + \gamma_{вз}},$$

где P — вес образца в воздухе; P_1 — вес пикнометра с жидкостью в воздухе; P_2 — вес пикнометра с жидкостью и с образцом в воздухе.

Этот способ может дать точность 0,001—0,0001%.

Примечание. При работе с пикнометром надо особенно тщательно следить за заполнением его до определенной метки и обсушиванием его снаружи.

Кроме указанных методов, основанных на взвешивании, для определения v твердого тела применяется метод ареометра с постоянным объемом (точность до 0,1%), метод повисания и др.

3. Метод объемомера (фиг. 11). Этот метод необходим при определении v растворимых в воде и пористых тел, когда ранее указанные методы не могут быть применены.

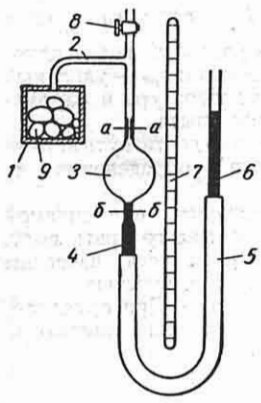
Предварительно перед началом опыта определяется объем емкости *3* от меток *б — б* до *а — а*. Это можно сделать взвешиванием количества ртути, наполняющей емкость, и при известном удельном весе ртути легко определить объем. Обозначим объем емкости *3* через V_1.

Далее взвешиваются кусочки твердого тела. Пусть их вес в воздухе будет P.

Затем при плотно закрытом пустом сосуде *1* и открытом кране *8* переме-

щают трубку *6* таким образом, чтобы ртуть заполнила емкость *3* до метки *а — а*.

После этого закрывают кран *8* и опускают трубку *6* с резиновой трубкой *5* до тех пор, пока уровень ртути в емкости *3* не достигнет метки *б — б*. Процесс этот надо проводить достаточно медленно, чтобы обеспечить изотермичность. Пусть при этом разность уровней ртути в трубках *4* и *6*, определяемая по шкале *7*, составит h_0 *мм* рт. ст. Тогда, обозначая объем сосуда *1* и соединительной линии *2* до крана *8* и метки *а — а* через V_2, получим по закону Бойля-Мариотта



Фиг. 11. Объемомер Лермантова.

$$V_2 \cdot B = (V_1 + V_2)(B - h_0),$$

откуда

$$V_2 = \frac{V_1 (B - h_0)}{h_0},$$

где B — барометрическое давление в *мм* рт. ст.

Поместим теперь в сосуд *1* кусочки твердого тела *9*, плотно закроем сосуд *1* и повторим проведенные выше операции. Тогда, обозначая объем кусочков твердого тела V, получим

$$(V_2 - V) \cdot B = (V_1 + V_2 - V)(B - h);$$

отсюда

$$V_2 - V = \frac{V_1 (B - h)}{h},$$

где h — новая разность уровней ртути в трубках *4* и *6* при уровне ртути в емкости *3* на метке *б — б*.

Из выражений для V_2 и $V_2 - V$ получим

$$V = V_1 \cdot B \frac{h - h_0}{h \cdot h_0}.$$

Этот объем твердого тела получен при проведении разрежения в приборе. Для уточнения результатов опыта следует произвести его вторично аналогично первому опыту, создавая на этот раз избыточное давление. При этом может быть получено второе уравнение, подобное последнему

$$V = V_1 \cdot B \frac{h' - h_0'}{h' \cdot h_0'},$$

где h_0' — разность уровней ртути в трубках *4* и *6* при заполнении емкости *3* ртутью от метки *б — б* до метки *а — а* при пустом сосуде *1* и закрытом кране *8*; h' — то же самое после помещения в сосуд *1* кусочков твердого тела. Исходным в этом случае является положение уровня ртути на метке при открытом кране *8*.

В качестве действительного значения объема твердого тела принимается среднее его значение, полученное из приведенных выше двух уравнений для v. Искомый удельный объем тогда может быть определен из выражения

$$v = \frac{V}{G} = \frac{V}{P + V \cdot \gamma_{вз}}.$$

При определении разностей уровней ртути, входящих в уравнение для полного объема твердого тела, можно ввести поправки на расширение шкалы объемомера и барометра. Поправку на температуру ртути в ртутном барометре и объемомере вводить не следует, если оба прибора находятся при одинаковой температуре.

Большое внимание при производстве опыта следует обратить на точность отсчета уровней ртути в трубках; отсчет нужно вести с точностью до 0,1 *мм*, следя за возможностью ошибки из-за параллакса. При конструировании прибора и его эксплуатации нужно обратить особое внимание на обеспечение герметичности сосуда *1*, а также соединительной системы.

При производстве опыта следует обеспечить сухость исследуемых кусочков твердого тела.

Обычная точность рассмотренного метода сравнительно мала — около 0,5%, поэтому при расчетах удельного объема можно пренебречь поправкой на вес вытесненного воздуха $G_{вз} = V \cdot \gamma_{вз}$, а также поправками на расширение шкал объемомера и барометра. Тщательное выполнение прибора и правильный выбор его размеров позволят увеличить указанную величину точности метода.

Определение удельного объема v жидкостей

1. Метод гидростатического взвешивания. Этот метод аналогичен таковому для твердых тел. Здесь в качестве твердого тела используется специально изготовленный стеклянный поплавок с вделанным в него термометром. Для определения объема поплавка необходимо произвести взвешивание поплавка в жидкости, для которой удельный вес хорошо известен, например в воде.

Определяемый удельный объем v исследуемой жидкости равен

$$v = \frac{V}{G} = \frac{V}{P_{ж} + V \cdot \gamma_{вз}} = \frac{1}{\frac{(P + P'_{н} - P'_{2})}{(P + P_{н} - P'_{1})}(\gamma_{в} - \gamma_{вз}) + \gamma_{вз}},$$

где V — объем вытесненной поплавком жидкости; $P_{ж}$ — вес вытесненной поплавком жидкости; P — вес поплавка в воздухе; P'_1 — вес поплавка и нити в воде; $P_{н}$ — вес нити, опущенной в воду до определенного положения; $\gamma_{в}$ — удельный вес воды; $\gamma_{вз}$ — удельный вес воздуха при условиях опыта; $P'_{н}$ — вес нити, опущенной до определенного положения в исследуемую жидкость; P'_2 — вес поплавка с нитью в исследуемой жидкости.

2. Метод пикнометра. Здесь необходимо произвести три взвешивания:

1) пустого пикнометра;
2) пикнометра, наполненного водой;
3) пикнометра с исследуемой жидкостью.

Удельный объем исследуемой жидкости определяется из формулы

$$v_{ж} = \frac{V}{G_{ж}} = \frac{V}{(P_3 - P_1) + V \cdot \gamma_{вз}} = \frac{1}{\left(\frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1}\right)(\gamma_{в} - \gamma_{вз}) + \gamma_{вз}};$$

где P_1 — вес пустого пикнометра в воздухе; P_2 — вес пикнометра, наполненного водой; P_3 — вес пикнометра с исследуемой жидкостью; $\gamma_{в}$ — удельный вес воды; $\gamma_{вз}$ — удельный вес воздуха.

При этом методе можно получить точность 0,0001%.

Кроме того, v жидкостей можно определить методом ареометра постоянного веса (точность до 0,1%), методом гидростатического взвешивания на специально изготовленных для этого весах с неравноплечим коромыслом.

Что же касается значений удельного объема v газов и паров жидкостей, то для их определения также существует много методов, достаточно широко освещенных в литературе [12].

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ

Коэффициент линейного расширения твердых тел

$$\alpha = \frac{1}{l}\frac{dl}{dt},$$

где l — линейный размер, меняется с изменением температуры, вследствие чего линейная зависимость

$$l_t = l_0(1 + \alpha t)$$

пригодна лишь для умеренного интервала температур. Для однородных твердых тел коэффициент объемного расширения $\beta = 3\alpha$.

Коэффициенты линейного расширения металлов и сплавов в различных интервалах температур даны в табл. 13.

Коэффициенты линейного расширения твердых тел $\alpha \cdot 10^6$ при 20° С [19]:

Кирпич	9,5	Плавиковый шпат	19,0
Цемент и бетон	10—14	Алмаз	1,2
Гранит	8,3	Графит	0,63
Мрамор	1,4—4,4	Кварц	0,55
Эбонит	64—77	Гуттаперча	198,0
Стекло:		Сера	60
мягкое 68% SiO_2; 14% NaO;		Шифер	1,0
0,7% CaO	8,5	Электротехнический фарфор	1,1
твердое 64% SiO_2; 20% K_2O;		Дуб $\parallel$ оси	4,9
11% CaO	9,7	„ $\perp$ оси	54,4
флинтглас	7,8	Сосна $\parallel$ оси	5,4
иенское 16'''	7,8	„ $\perp$ оси	34,0
иенское 59'''	5,7	(для дуба и сосны в интервале 2—34° С)	
пирекс	3,0		

Коэффициент объемного расширения жидкостей α. Линейная функция $v_t = v_0(1 + \alpha t)$ в связи с зависимостью α от температуры применяется для умеренного интервала температур.

Коэффициенты объемного расширения жидкостей $\alpha \cdot 10^5$ при 20° С (в отдельных

Таблица 13

Коэффициенты линейного расширения металлов и сплавов $\alpha \cdot 10^6$ ([19], [21], [22] и [23])

Название металла или сплава	Температурный интервал в °С										
	20—50	20—100	20—200	20—300	20—400	20—500	20—600	20—700	20—800	20—900	20—1000
Алюминий чистый	—	23,9	24,3	25,3	26,5	—	—	—	—	—	—
Электролитическая медь	16,9	17,0	17,3	17,6	17,9	18,3	—	—	—	—	—
Техническая медь	16,9	16,6—17,1	17,1—17,2	17,6	18,0—18,1	18,6	—	—	—	—	—
Красная латунь	—	17,2	17,5	17,9	—	—	—	—	—	—	—
Желтая латунь	—	17,8	18,8	20,9	—	—	—	—	—	—	—
Оловянистая бронза	—	17,6	17,9	18,2	—	—	—	—	—	—	—
Алюминиевая бронза	—	17,6	17,9	19,2	—	—	—	—	—	—	—
Железо	11,8	12,2	12,8	13,4	13,9	14,5	14,5	14,6	14,6	14,8	—
Сталь углеродистая	—	10,6—12,2	11,3—13,0	12,1—13,5	12,9—13,9	13,5—14,3	14,2—14,7	14,7—15,0	—	—	—
Сталь хромистая	—	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	—	—	—	—	—
Чугун	—	8,7—11,1	8,5—11,6	10,1—12,2	11,5—12,7	12,9—13,2	—	—	—	—	—
Свинец	28,8	29,1	30,0	31,3	—	—	—	—	—	—	—
Магний	—	26,1	27,0	28,0	28,9	29,9	—	—	—	—	—
Никель	—	13,3	13,9	14,4	15,1	15,2	15,5	15,8	16,0	16,3	—
Олово чистое	23,2	23,8	24,2	—	—	—	—	—	—	—	—
Цинк	—	39,5	39,7	39,7	—	—	—	—	—	—	—
Сурьма, в зависимости от ориентации кристаллов в поликристаллическом материале	8,5—10,8	8,4—11,0	8,7—11,3	9,2—11,4	9,2—11,5	9,5—11,6	9,7—11,6	—	—	—	—
Висмут	—	13,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Хром отожженный	—	6,6	7,3	7,9	8,4	8,8	9,1	9,1	—	—	—
Золото чистое	14,2	14,3	14,5	14,7	15,0	15,2	15,5	15,8	16,1	16,5	16,6
Марганец	—	22,8	24,0	25,2	—	—	—	—	—	—	—
Платина чистая	9,0	9,1	9,2	9,3	9,4	9,6	9,7	9,8	9,9	10,0	10,2
Серебро чистое	19,6	19,6	19,8	20,0	20,3	20,6	21,0	21,4	21,8	22,4	—
Вольфрам, температурный интервал 0—100° С	—	3,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нихром (первое значение для t=20° С, второе — для интервала 70—1000° С)	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17,6
Ферронихром	(для t = 20° С)	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Монель-металл	—	14	—	15	—	—	—	—	—	—	—
Константан	(для t = 20° С)	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Копель	(для t = 20° С)	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Манганин (температурный интервал 0—100° С)	—	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—

случаях указаны другие температуры):

Уксусная кислота	107	То же в интервале 20—199°	110
Метиловый спирт	122	Пентан	159
Этиловый спирт	110	Ксилол	101
Амиловый спирт	93	Вода в интервале:	
Бензин	124	5—10°	5,3
Хлороформ	126	10—20°	15,0
Толуол	109	20—40°	30,2
Скипидар	94	40—60°	45,8
Эфир этиловый	163	60—80°	58,7
Этил бромистый	137	Водные растворы в %:	
Глицерин	53	$CaCl_2$ 5,8	25,0
Ртуть	18,18	$CaCl_2$ 40,9	45,8
Метил иодистый	121	NaCl 26	43,6
Масло оливковое	70	Na_2SO_4 100	57,0
Масло парафиновое	90		

Коэффициент объемного расширения газов. Объемный коэффициент α при постоянном давлении определяется из уравнения $v_t = v_0(1 + \alpha t)$; коэффициент давления β при постоянном объеме определяется из уравнения $p_t = p_0(1 + \beta t)$, где v_t и p_t — объем и давление при $t°$ С, v_0 и p_0 — объем и давление при 0° С. Коэффициенты α и β зависят от начального давления газа: чем ниже давление газа, тем меньше различие между α и β (табл. 14).

Таблица 14

Коэффициенты объемного расширения и коэффициенты давления технически важных газов в интервале температур 0—100° С [3]

Название газов	p в *см* рт. ст.	α	β
Воздух	100,1	0,0036726	0,0036744
Азот	100	0,0036742	0,0036740
Кислород	66	—	0,0036738
Водород	99,4	0,0036589	0,0036626
Гелий	99,4	0,0036579	0,0036604
Окись углерода	76	0,003669	0,003667
Двуокись углерода	99,8	0,0037410	0,0037262
Двуокись серы	76	0,003903	0,003845

Для идеального газа объемный коэффициент α и коэффициент давления β имеют одно и то же числовое значение, равное $\frac{1}{273{,}16}$ или 0,0036604. С достаточной для ряда технических расчетов точностью это значение α и β может быть принято для большинства реальных газов.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Удельной теплоемкостью называется количество тепла (в *ккал*), необходимое для нагревания единицы количества вещества на 1° С.

Различают следующие теплоемкости:

а) мольная теплоемкость μc *ккал/моль град*;

б) весовая теплоемкость c *ккал/кГ град*;

в) объемная теплоемкость C или c' *ккал/нм³ град*.

Объемные теплоемкости газа относятся обычно к объему газа, приведенному к нормальному состоянию, т. е. к 0° С и 760 *мм* рт. ст.

Зависимости между мольной, весовой и объемной теплоемкостями:

$$\mu c = c \cdot \mu = c' \ 22{,}4;$$

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c'}{\gamma_н};$$

$$c' = \frac{\mu c}{22{,}4} = c \cdot \gamma_н,$$

где μ — молекулярный вес вещества; $\gamma_н$ — удельный вес газа при нормальных условиях и 22,4 — объем моля при нормальных условиях.

Теплоемкость идеальных газов зависит только от условий нагревания, т. е. от процесса и температуры.

Теплоемкость реальных газов зависит от процесса, температуры и давления.

В зависимости от условий нагревания различают: теплоемкость при постоянном давлении — c_p, c'_p, μc_p; теплоемкость при постоянном объеме — c_v, c'_v, μc_v.

Для идеального газа

$$\mu c_p - \mu c_v = A\mu R \approx 2,$$

или

$$c_p - c_v = AR,$$

где A — тепловой эквивалент работы; R *кГм/кг град* — газовая постоянная, $\mu R = 848$ *кГм/моль град* $= 1{,}986$ *ккал/моль град* — универсальная газовая постоянная одного моля газа.

Согласно молекулярно-кинетической теории для идеальных газов: одноатомного $\mu c_v = 3$, $\mu c_p = 5$; $k = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}66$; двухатомного $\mu c_v = 5$; $\mu c_p = 7$; $k = 1{,}4$; трех- и многоатомного $\mu c_v = 7$; $\mu c_p = 9$; $k = 1{,}29$.

Кроме того, различают среднюю и истинную теплоемкости в зависимости от того, в каком интервале температур она определена.

Средняя теплоемкость c_m — величина теплоемкости, определенная в конечном интервале температур,

$$c_m = \frac{q}{t_2 - t_1}.$$

Истинная теплоемкость c — теплоемкость вещества в данном термодинамическом состоянии (при данных p, T или v, T), т. е. в данной точке

$$c = \frac{dq}{dt}.$$

Связь между средней и истинной теплоемкостями имеет вид

$$c_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c\,dt.$$

Зависимость теплоемкости от температуры. Для двухатомных газов в интервалах температур, встречающихся обычно в тепловых расчетах, зависимость теплоемкости от температуры можно принять линейной, т. е.

$$c = a + bt,$$

где a — величина теплоемкости при $t = 0°$ С; bt — изменение теплоемкости в зависимости от температуры. В этом случае средняя теплоемкость

$$c_m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (a + bt)\,dt}{t_2 - t_1} = a + \frac{b}{2}(t_2 + t_1).$$

В случае, если $t_1 = 0°$ С; $t_2 = t$,

$$c_m = a + \frac{b}{2} t.$$

Определение теплоты, сообщаемой газу в процессе, по средним теплоемкостям c. Обычно тепло, сообщаемое газу в процессе, в котором его температура изменяется от t_1 до t_2, определяется по формуле

$$q = [c]_0^{t_2} \cdot t_2 - [c]_0^{t_1} \cdot t_1,$$

где $[c]_0^{t_2}$ и $[c]_0^{t_1}$ — величины средних теплоемкостей в соответствующих интервалах температур, которые берутся по справочным таблицам теплоемкостей.

В табл. 15 приводятся величины теплоемкости воды при давлении 1 *кГ/см²* (по экспериментальным данным).

В табл. 16 приводятся величины теплоемкостей газов, вычисленные на основе новейших данных [4].

Таблица 15 [2]

t° С	c_p *ккал/кГ·град*	t° С	c_p *ккал/кГ·град*	t° С	c_p *ккал/кГ·град*
0	1,0074	35	0,9979	70	1,0007
5	1,0037	40	0,9980	75	1,0014
10	1,0013	45	0,9982	80	1,0023
15	0,9998	50	0,9985	85	1,0033
20	0,9988	55	0,9989	90	1,0044
25	0,9983	60	0,9994	95	1,0056
30	0,9980	65	1,0000	100	1,0070

Средняя удельная теплоемкость твердых и капельно-жидких тел между 0 и 100° С в *ккал/кГ·град*:

Анилин	0,49
Асбест	0,195
Асфальт естественный	0,22—0,5
Базальт	0,20
Бензин (при 10° С)	0,340
Бензол	0,44
Бетон сухой	0,21—0,27
Гетинакс листовой марки А	0,3—0,4
Гипс	0,20
Глицерин безводный	0,58
Гранит	0,20
Графит	0,19
Дерево: дуб	0,57
сосна	0,65
Древесные опилки	0,24
Древесный уголь (при 18°С)	0,277
Зола	0,20
Каменный уголь	0,31
Каучук	0,27—0,48
Керосин	0,50
Кизельгур рыхлый	0,21
Кирпич	0,22
Кокс	0,20
Кремний	0,177
Лед	0,50
Масло машинное	0,40
Масло трансформаторное	0,45
Миканит	0,05—0,2
Мрамор	0,24
Нафталин	0,31
Парафин	0,8
Песчаник	0,22
Сера	0,18
Серная кислота	0,33
Сернистая кислота	0,32
Скипидар	0,42
Слюда	0,2—0,7
Спирт: метиловый (при 12° С)	0,601
этиловый (при 0°)	0,547
Стекло	0,12—0,20
Уксусная кислота	0,51
Фарфор	0,25
Цемент	0,27
Шифер	0,2
Шлаки	0,18
Эбонит	0,59
Эмали	0,3
Эфир	0,54

Теплоемкость, энтальпия и энтропия кислорода O_2 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	6,992	5,006	6,992	5,006	0,2185	0,1564	0,2185	0,1564	0,3119	0,2233	0,3119	0,2233	0	0	0	0	0	0
100	7,136	5,150	7,055	5,069	0,2230	0,1609	0,2205	0,1584	0,3184	0,2298	0,3147	0,2261	705,5	22,05	31,47	2,161	0,0675	0,0964
200	7,360	5,374	7,149	5,163	0,2300	0,1679	0,2234	0,1613	0,3284	0,2397	0,3189	0,2303	1 430	44,68	63,78	3,884	0,1214	0,1732
300	7,603	5,617	7,261	5,275	0,2376	0,1755	0,2269	0,1648	0,3392	0,2506	0,3239	0,2353	2 178	68,07	97,17	5,318	0,1662	0,2372
400	7,824	5,838	7,375	5,389	0,2445	0,1824	0,2305	0,1684	0,3491	0,2605	0,3290	0,2404	2 950	92,20	131,6	6,560	0,2050	0,2926
500	8,013	6,027	7,484	5,498	0,2504	0,1833	0,2339	0,1718	0,3575	0,2689	0,3339	0,2453	3 742	116,9	166,9	7,656	0,2393	0,3415
600	8,169	6,183	7,586	5,600	0,2553	0,1932	0,2371	0,1750	0,3644	0,2758	0,3384	0,2498	4 552	142,3	203,0	8,640	0,2700	0,3854
700	8,299	6,313	7,679	5,693	0,2593	0,1973	0,2400	0,1779	0,3702	0,2816	0,3426	0,2540	5 375	168,0	239,8	9,534	0,2979	0,4253
800	8,408	6,422	7,763	5,777	0,2627	0,2007	0,2426	0,1805	0,3751	0,2865	0,3463	0,2577	6 210	194,1	277,0	10,350	0,3234	0,4617
900	8,499	6,513	7,840	5,854	0,2656	0,2035	0,2450	0,1829	0,3792	0,2906	0,3498	0,2612	7 056	220,5	314,8	11,103	0,3470	0,4953
1000	8,578	6,592	7,910	5,924	0,2682	0,2060	0,2472	0,1851	0,3827	0,2941	0,3529	0,2643	7 910	247,2	352,9	11,802	0,3688	0,5265
1100	8,650	6,664	7,974	5,988	0,2703	0,2082	0,2492	0,1871	0,3859	0,2973	0,3557	0,2671	8 771	274,1	391,3	12,453	0,3892	0,5555
1200	8,715	6,729	8,033	6,047	0,2723	0,2103	0,2510	0,1890	0,3888	0,3002	0,3584	0,2698	9 640	301,2	430,1	13,063	0,4082	0,5827
1300	8,778	6,792	8,088	6,102	0,2743	0,2122	0,2527	0,1907	0,3916	0,3030	0,3608	0,2722	10 510	328,5	469,0	13,638	0,4262	0,6084
1400	8,837	6,851	8,139	6,153	0,2762	0,2141	0,2543	0,1923	0,3942	0,3056	0,3631	0,2745	11 390	356,0	508,3	14,181	0,4432	0,6326
1500	8,895	6,909	8,188	6,202	0,2780	0,2159	0,2559	0,1938	0,3968	0,3082	0,3653	0,2767	12 280	383,8	547,9	14,695	0,4592	0,6555
1600	8,952	6,966	8,234	6,248	0,2797	0,2177	0,2573	0,1952	0,3994	0,3108	0,3673	0,2787	13 170	411,7	587,7	15,185	0,4745	0,6774
1700	9,008	7,022	8,278	6,292	0,2815	0,2194	0,2587	0,1966	0,4019	0,3133	0,3693	0,2807	14 070	439,8	627,8	15,652	0,4891	0,6982
1800	9,063	7,077	8,320	6,334	0,2832	0,2212	0,2600	0,1979	0,4043	0,3157	0,3712	0,2826	14 980	468,0	668,2	16,098	0,5031	0,7181
1900	9,118	7,132	8,361	6,375	0,2849	0,2229	0,2613	0,1992	0,4068	0,3182	0,3730	0,2844	15 890	496,5	708,7	16,527	0,5165	0,7373
2000	9,173	7,187	8,400	6,414	0,2867	0,2246	0,2625	0,2004	0,4092	0,3206	0,3748	0,2861	16 800	525,0	749,6	16,939	0,5293	0,7557
2100	9,228	7,242	8,438	6,452	0,2884	0,2263	0,2637	0,2016	0,4117	0,3231	0,3764	0,2878	17 720	553,8	790,4	17,335	0,5417	0,7733
2200	9,281	7,295	8,475	6,489	0,2900	0,2280	0,2648	0,2028	0,4141	0,3255	0,3781	0,2895	18 640	582,6	831,8	17,716	0,5536	0,7903
2300	9,334	7,348	8,511	6,525	0,2917	0,2296	0,2660	0,2039	0,4164	0,3278	0,3797	0,2911	19 570	611,8	873,3	18,085	0,5652	0,8068
2400	9,385	7,399	8,547	6,561	0,2933	0,2312	0,2671	0,2050	0,4197	0,3301	0,3813	0,2927	20 510	641,0	915,1	18,442	0,5763	0,8227
2500	9,435	7,449	8,581	6,595	0,2948	0,2328	0,2682	0,2061	0,4209	0,3328	0,3828	0,2942	21 450	670,5	957,0	18,788	0,5871	0,8382
2600	9,484	7,498	8,615	6,629	0,2964	0,2343	0,2692	0,2072	0,4231	0,3345	0,3843	0,2957	22 400	699,9	999,2	19,122	0,5976	0,8531
2700	9,532	7,546	8,648	6,662	0,2979	0,2358	0,2702	0,2082	0,4253	0,3367	0,3858	0,2972	23 350	729,5	1042	19,448	0,6078	0,8676

Таблица 17

Теплоемкость, энтальпия и энтропия азота N_2 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	$\frac{\text{ккал}}{\text{моль}\cdot\text{град}}$				$\frac{\text{ккал}}{\text{кГ}\cdot\text{град}}$				$\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3\cdot\text{град}}$				$\frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кГ}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{моль}\cdot\text{град}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кГ}\cdot\text{град}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3\cdot\text{град}}$
0	6,954	4,968	6,954	4,968	0,2482	0,1773	0,2482	0,1773	0,3102	0,2216	0,3102	0,2216	0	0	0	0	0	0
100	6,974	4,988	6,961	4,975	0,2489	0,1780	0,2485	0,1776	0,3111	0,2225	0,3106	0,2220	696,1	24,85	31,06	2,171	0,0775	0,0969
200	7,039	5,053	6,981	4,995	0,2512	0,1804	0,2492	0,1783	0,3140	0,2254	0,3114	0,2228	1 396	49,84	62,28	3,833	0,1368	0,1710
300	7,154	5,168	7,018	5,032	0,2554	0,1845	0,2505	0,1796	0,3192	0,2306	0,3131	0,2245	2 105	75,15	93,93	5,193	0,1854	0,2317
400	7,303	5,317	7,070	5,084	0,2607	0,1898	0,2524	0,1815	0,3258	0,2372	0,3154	0,2268	2 828	100,1	126,2	6,355	0,2268	0,2835
500	7,464	5,478	7,133	5,147	0,2664	0,1955	0,2546	0,1837	0,3330	0,2444	0,3182	0,2296	3 567	127,3	159,1	7,377	0,2633	0,3291
600	7,624	5,638	7,201	5,215	0,2721	0,2012	0,2570	0,1861	0,3401	0,2515	0,3213	0,2327	4 321	154,2	192,8	8,294	0,2961	0,3700
700	7,772	5,786	7,273	5,287	0,2774	0,2065	0,2596	0,1887	0,3467	0,2581	0,3245	0,2359	5 091	181,7	227,2	9,129	0,3259	0,4073
800	7,906	5,920	7,344	5,358	0,2822	0,2113	0,2621	0,1912	0,3527	0,2641	0,3276	0,2390	5 875	209,7	262,1	9,896	0,3532	0,4415
900	8,025	6,039	7,413	5,427	0,2864	0,2156	0,2646	0,1937	0,3580	0,2694	0,3307	0,2421	6 672	238,1	297,6	10,606	0,3786	0,4732
1000	8,130	6,144	7,479	5,493	0,2902	0,2193	0,2670	0,1961	0,3627	0,2741	0,3337	0,2451	7 479	267,0	333,7	11,266	0,4021	0,5026
1100	8,222	6,236	7,542	5,556	0,2935	0,2226	0,2692	0,1983	0,3668	0,2782	0,3365	0,2479	8 296	296,1	370,2	11,885	0,4242	0,5302
1200	8,303	6,317	7,602	5,616	0,2964	0,2255	0,2713	0,2005	0,3704	0,2818	0,3392	0,2506	9 122	325,6	407,0	12,466	0,4449	0,5561
1300	8,374	6,388	7,659	5,673	0,2989	0,2280	0,2734	0,2025	0,3736	0,2850	0,3417	0,2531	9 957	355,4	444,2	13,013	0,4645	0,5806
1400	8,436	6,450	7,713	5,727	0,3011	0,2302	0,2753	0,2044	0,3764	0,2878	0,3441	0,2555	10 800	385,4	481,7	13,531	0,4830	0,6037
1500	8,490	6,504	7,763	5,777	0,3030	0,2322	0,2771	0,2062	0,3788	0,2902	0,3463	0,2577	11 640	415,7	519,5	14,022	0,5005	0,6256
1600	8,538	6,552	7,810	5,824	0,3048	0,2339	0,2788	0,2079	0,3809	0,2923	0,3484	0,2598	12 500	446,1	557,4	14,489	0,5172	0,6464
1700	8,581	6,595	7,854	5,868	0,3063	0,2354	0,2803	0,2095	0,3828	0,2942	0,3504	0,2618	13 350	476,5	595,7	14,935	0,5331	0,6663
1800	8,620	6,634	7,895	5,909	0,3077	0,2368	0,2818	0,2109	0,3846	0,2960	0,3522	0,2636	14 210	507,2	634,0	15,360	0,5483	0,6853
1900	8,655	6,669	7,934	5,948	0,3089	0,2380	0,2832	0,2123	0,3861	0,2975	0,3540	0,2654	15 070	538,1	672,6	15,767	0,5628	0,7034
2000	8,686	6,700	7,971	5,985	0,3100	0,2391	0,2845	0,2136	0,3875	0,2989	0,3556	0,2670	15 940	569,0	711,2	16,157	0,5767	0,7208
2100	8,714	6,728	8,006	6,020	0,3110	0,2401	0,2858	0,2149	0,3888	0,3002	0,3572	0,2686	16 810	600,2	750,1	16,531	0,5901	0,7375
2200	8,740	6,754	8,039	6,053	0,3120	0,2411	0,2869	0,2161	0,3899	0,3013	0,3587	0,2700	17 690	631,2	789,1	16,892	0,6029	0,7536
2300	8,764	6,778	8,070	6,084	0,3128	0,2419	0,2880	0,2172	0,3910	0,3024	0,3600	0,2714	18 560	662,4	828,0	17,239	0,6153	0,7691
2400	8,786	6,800	8,099	6,113	0,3136	0,2427	0,2891	0,2182	0,3920	0,3034	0,3613	0,2727	19 440	693,8	867,1	17,573	0,6273	0,7840
2500	8,806	6,820	8,126	6,140	0,3143	0,2434	0,2900	0,2192	0,3929	0,3043	0,3625	0,2739	20 320	725,0	906,3	17,896	0,6388	0,7984

Теплоемкость, энтальпия и энтропия атмосферного азота $N_{2атм}$ [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	6,931	4,945	6,931	4,945	0,2461	0,1756	0,2461	0,1756	0,3092	0,2206	0,3092	0,2206	0	0	0	0	0	0
100	6,951	4,965	6,938	4,952	0,2469	0,1763	0,2464	0,1759	0,3101	0,2215	0,3095	0,2209	693,8	24,64	30,95	2,164	0,0768	0,0965
200	7,016	5,030	6,958	4,968	0,2491	0,1786	0,2471	0,1766	0,3130	0,2244	0,3104	0,2218	1 392	49,42	62,08	3,821	0,1357	0,1705
300	7,130	5,144	6,995	5,009	0,2532	0,1827	0,2484	0,1779	0,3181	0,2295	0,3121	0,2235	2 099	74,52	93,63	5,176	0,1838	0,2309
400	7,277	5,291	7,046	5,060	0,2584	0,1879	0,2502	0,1797	0,3247	0,2361	0,3144	0,2258	2 818	100,1	125,8	6,333	0,2249	0,2825
500	7,436	5,450	7,109	5,123	0,2641	0,1935	0,2524	0,1819	0,3318	0,2432	0,3171	0,2285	3 555	126,2	158,6	7,352	0,2611	0,3280
600	7,594	5,608	7,176	5,190	0,2697	0,1992	0,2548	0,1843	0,3388	0,2502	0,3201	0,2315	4 306	152,9	192,1	8,266	0,2935	0,3688
700	7,741	5,755	7,247	5,261	0,2749	0,2044	0,2574	0,1868	0,3453	0,2567	0,3233	0,2347	5 073	180,2	226,3	9,097	0,3230	0,4059
800	7,873	5,887	7,317	5,331	0,2796	0,2091	0,2599	0,1893	0,3513	0,2627	0,3265	0,2379	5 854	207,9	261,2	9,861	0,3502	0,4399
900	7,991	6,005	7,386	5,400	0,2838	0,2132	0,2623	0,1918	0,3565	0,2679	0,3295	0,2409	6 647	236,1	296,6	10,568	0,3753	0,4715
1000	8,095	6,109	7,451	5,465	0,2874	0,2169	0,2646	0,1941	0,3611	0,2725	0,3324	0,2438	7 451	264,6	332,4	11,226	0,3992	0,5008
1100	8,186	6,200	7,513	5,527	0,2907	0,2202	0,2668	0,1963	0,3652	0,2766	0,3352	0,2466	8 264	293,5	368,7	11,841	0,4205	0,5283
1200	8,266	6,280	7,573	5,587	0,2935	0,2230	0,2689	0,1984	0,3688	0,2802	0,3378	0,2492	9 088	322,7	405,4	12,419	0,4410	0,5541
1300	8,336	6,350	7,629	5,643	0,2960	0,2255	0,2709	0,2004	0,3719	0,2833	0,3404	0,2518	9 918	352,2	442,5	12,958	0,460.	0,5781
1400	8,397	6,411	7,682	5,696	0,2982	0,2277	0,2728	0,2023	0,3746	0,2860	0,3427	0,2541	10 750	381,9	479,8	13,480	0,4787	0,6014
1500	8,451	6,465	7,732	5,746	0,3001	0,2296	0,2746	0,2040	0,3770	0,2884	0,3449	0,2563	11 598	411,9	517,4	13,969	0,4961	0,6232
1600	8,498	6,512	7,778	5,792	0,3018	0,2313	0,2762	0,2057	0,3791	0,2905	0,3470	0,2584	12 440	441,9	555,2	14,434	0,5126	0,6440
1700	8,541	6,555	7,822	5,836	0,3033	0,2328	0,2778	0,2072	0,3810	0,2924	0,3490	0,2604	13 300	472,3	593,3	14,877	0,5283	0,6637
1800	8,579	6,593	7,862	5,876	0,3047	0,2341	0,2792	0,2087	0,3827	0,2941	0,3508	0,2622	14 150	502,6	631,4	15,300	0,5433	0,6826
1900	8,614	6,628	7,901	5,915	0,3059	0,2354	0,2806	0,2100	0,3843	0,2957	0,3525	0,2639	15 010	533,1	669,8	15,705	0,5577	0,7007
2000	8,644	6,658	7,937	5,951	0,3070	0,2364	0,2819	0,2113	0,3857	0,2971	0,3541	0,2655	15 870	563,8	708,2	16,093	0,5715	0,7180
2100	8,672	6,686	7,972	5,986	0,3080	0,2374	0,2831	0,2125	0,3869	0,2983	0,3557	0,2671	16 740	594,5	747,0	16,466	0,5847	0,7346
2200	8,698	6,712	8,005	6,019	0,3089	0,2383	0,2843	0,2137	0,3880	0,2994	0,3571	0,2685	17 610	625,5	785,6	16,825	0,5975	0,7506
2300	8,721	6,735	8,035	6,049	0,3097	0,2392	0,2853	0,2148	0,3891	0,3005	0,3585	0,2699	18 480	656,2	824,6	17,170	0,6097	0,7660
2400	8,743	6,757	8,044	6,078	0,3105	0,2400	0,2864	0,2158	0,3901	0,3015	0,3598	0,2712	19 350	687,4	863,5	17,503	0,6216	0,7809
2500	8,763	6,777	8,091	6,105	0,3112	0,2407	0,2873	0,2168	0,3909	0,3023	0,3610	0,2723	20 230	718,3	902,5	17,824	0,6330	0,7952

Таблица 19

Теплоемкость, энтальпия и энтропия воздуха [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал/моль·град				ккал/кГ·град				ккал/нм³·град				ккал/моль	ккал/кГ	ккал/нм³	ккал/моль·град	ккал/кГ·град	ккал/нм³·град
0	6,944	4,958	6,944	4,958	0,2397	0,1711	0,2397	0,1711	0,3098	0,2212	0,3098	0,2212	0	0	0	0	0	0
100	6,990	5,004	6,963	4,977	0,2413	0,1727	0,2403	0,1718	0,3119	0,2233	0,3106	0,2220	696,3	24,03	31,06	2,164	0,07468	0,0965
200	7,088	5,102	6,998	5,012	0,2447	0,1761	0,2416	0,1730	0,3162	0,2276	0,3122	0,2236	1 400	48,32	62,44	3,834	0,1324	0,1711
300	7,229	5,243	7,051	5,065	0,2495	0,1810	0,2434	0,1748	0,3225	0,2339	0,3146	0,2260	2 115	73,02	94,38	5,206	0,1797	0,2323
400	7,392	5,406	7,115	5,129	0,2552	0,1866	0,2456	0,1771	0,3298	0,2412	0,3174	0,2288	2 846	98,24	127,0	6,381	0,2203	0,2847
500	7,557	5,571	7,188	5,202	0,2609	0,1923	0,2481	0,1796	0,3372	0,2486	0,3207	0,2321	3 594	124,1	160,4	7,416	0,2560	0,3309
600	7,715	5,729	7,262	5,276	0,2663	0,1978	0,2507	0,1821	0,3442	0,2556	0,3240	0,2354	4 357	150,4	194,4	8,345	0,2880	0,3723
700	7,858	5,872	7,338	5,352	0,2712	0,2027	0,2533	0,1847	0,3506	0,2620	0,3274	0,2388	5 137	177,3	229,2	9,189	0,3172	0,4100
800	7,985	5,999	7,411	5,425	0,2756	0,2071	0,2558	0,1873	0,3563	0,2677	0,3306	0,2420	5 929	204,6	264,5	9,964	0,3439	0,4445
900	8,098	6,112	7,481	5,495	0,2795	0,2110	0,2583	0,1897	0,3613	0,2727	0,3338	0,2451	6 733	232,5	300,4	10,680	0,3687	0,4765
1000	8,196	6,210	7,547	5,561	0,2829	0,2144	0,2605	0,1920	0,3657	0,2771	0,3367	0,2481	7 547	260,5	336,7	11,347	0,3917	0,5062
1100	8,283	6,297	7,610	5,624	0,2859	0,2174	0,2627	0,1941	0,3695	0,2809	0,3395	0,2509	8 371	289,0	373,5	11,970	0,4132	0,5340
1200	8,360	6,374	7,669	5,683	0,2886	0,2200	0,2647	0,1962	0,3730	0,2844	0,3422	0,2536	9 203	317,6	410,6	12,555	0,4334	0,5601
1300	8,429	6,443	7,725	5,739	0,2909	0,2224	0,2667	0,1981	0,3760	0,2874	0,3447	0,2561	10 040	346,7	448,1	13,101	0,4522	0,5845
1400	8,490	6,504	7,778	5,792	0,2930	0,2245	0,2685	0,1999	0,3788	0,2901	0,3470	0,2584	10 890	375,9	485,8	13,628	0,4704	0,6080
1500	8,544	6,558	7,828	5,842	0,2949	0,2264	0,2702	0,2016	0,3812	0,2926	0,3492	0,2606	11 740	405,3	523,8	14,122	0,4875	0,6300
1600	8,593	6,607	7,874	5,888	0,2966	0,2281	0,2718	0,2032	0,3834	0,2948	0,3513	0,2627	12 600	434,9	562,1	14,592	0,5037	0,6510
1700	8,639	6,653	7,918	5,932	0,2982	0,2296	0,2733	0,2047	0,3854	0,2968	0,3532	0,2646	13 460	464,6	600,4	15,040	0,5224	0,6710
1800	8,681	6,695	7,958	5,972	0,2996	0,2311	0,2747	0,2062	0,3873	0,2987	0,3551	0,2665	14 320	494,5	639,2	15,468	0,5339	0,6901
1900	8,720	6,734	7,997	6,011	0,3010	0,2324	0,2761	0,2075	0,3890	0,3004	0,3568	0,2682	15 190	524,6	677,9	15,878	0,5481	0,7084
2000	8,755	6,769	8,035	6,049	0,3022	0,2337	0,2773	0,2088	0,3906	0,3020	0,3585	0,2698	16 070	554,6	717,0	16,271	0,5617	0,7259
2100	8,789	6,808	8,070	6,084	0,3034	0,2348	0,2786	0,2100	0,3921	0,3035	0,3600	0,2714	16 950	585,1	756,0	16,649	0,5747	0,7428
2200	8,820	6,834	8,103	6,117	0,3045	0,2359	0,2797	0,2112	0,3935	0,3049	0,3615	0,2729	17 830	615,3	795,3	17,012	0,5872	0,7590
2300	8,850	6,864	8,135	6,149	0,3055	0,2369	0,2808	0,2123	0,3948	0,3062	0,3629	0,2743	18 710	645,8	834,7	17,363	0,6031	0,7746
2400	8,878	6,892	8,165	6,179	0,3065	0,2379	0,2819	0,2133	0,3961	0,3075	0,3643	0,2757	19 600	676,6	874,3	17,700	0,6110	0,7897
2500	8,904	6,918	8,194	6,208	0,3074	0,2388	0,2828	0,2143	0,3972	0,3086	0,3655	0,2769	20 490	707,0	913,8	18,027	0,6223	0,8043

Таблица 20

Теплоёмкость, энтальпия и энтропия водорода H_2 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	6,835	4,849	6,835	4,849	3,3904	2,4053	3,3904	2,4053	0,3049	0,2163	0,3049	0,2163	0	0	0	0	0	0
100	6,957	4,971	6,911	4,925	3,4509	2,4658	3,4281	2,4430	0,3104	0,2218	0,3083	0,2197	691,1	342,8	30,83	2,112	1,048	0,0942
200	6,984	4,998	6,944	4,958	3,4643	2,4792	3,4444	2,4593	0,3116	0,2230	0,3098	0,2212	1 389	688,9	61,96	3,775	1,872	0,1684
300	6,998	5,012	6,956	4,970	3,4712	2,4861	3,4504	2,4653	0,3122	0,2236	0,3103	0,2217	2 087	1 035	93,09	5,114	2,537	0,2281
400	7,021	5,035	6,971	4,985	3,4826	2,4975	3,4578	2,4727	0,3132	0,2246	0,3110	0,2224	2 788	1 383	124,4	6,242	3,096	0,2785
500	7,060	5,074	6,986	5,000	3,5020	2,5169	3,4653	2,4802	0,3150	0,2264	0,3117	0,2231	3 493	1 733	155,8	7,216	3,579	0,3219
600	7,116	5,130	7,002	5,016	3,5298	2,5446	3,4732	2,4881	0,3175	0,2289	0,3124	0,2238	4 201	2 084	187,4	8,078	4,007	0,3604
700	7,189	5,203	7,024	5,038	3,5660	2,5808	3,4841	2,4990	0,3207	0,2321	0,3134	0,2248	4 917	2 439	219,4	8,855	4,392	0,3950
800	7,278	5,292	7,050	5,064	3,6101	2,6250	3,4970	2,5119	0,3247	0,2361	0,3145	0,2259	5 640	2 798	251,6	9,562	4,743	0,4266
900	7,373	5,387	7,081	5,095	3,6572	2,6721	3,5124	2,5273	0,3289	0,2403	0,3159	0,2273	6 373	3 161	284,3	10,214	5,066	0,4557
1000	7,472	5,486	7,115	5,129	3,7063	2,7212	3,5293	2,5441	0,3333	0,2447	0,3174	0,2288	7 115	3 529	317,4	10,822	5,368	0,4828
1100	7,577	5,591	7,152	5,166	3,7584	2,7733	3,5476	2,5625	0,3380	0,2494	0,3191	0,2305	7 867	3 902	351,0	11,389	5,649	0,5081
1200	7,680	5,694	7,191	5,205	3,8095	2,8244	3,5670	2,5818	0,3426	0,2540	0,3208	0,2322	8 629	4 280	385,0	11,925	5,915	0,5320
1300	7,784	5,798	7,234	5,248	3,8611	2,8760	3,5883	2,6032	0,3473	0,2587	0,3227	0,2341	9 404	4 665	419,5	12,434	6,168	0,5547
1400	7,882	5,896	7,277	5,291	3,9097	2,9246	3,6096	2,6245	0,3516	0,2630	0,3246	0,2360	10 190	5 053	454,4	12,917	6,407	0,5763
1500	7,976	5,990	7,320	5,334	3,9563	2,9712	3,6309	2,6458	0,3558	0,2672	0,3266	0,2380	10 980	5 446	489,9	13,377	6,635	0,5968
1600	8,064	6,078	7,364	5,378	4,0000	3,0149	3,6528	2,6677	0,3598	0,2712	0,3285	0,2399	11 780	5 844	525,6	13,817	6,854	0,6164
1700	8,148	6,162	7,407	5,421	4,0417	3,0565	3,6741	2,6890	0,3635	0,2749	0,3304	0,2418	12 590	6 246	561,7	14,239	7,063	0,6352
1800	8,227	6,241	7,450	5,464	4,0808	3,0957	3,6954	2,7103	0,3670	0,2784	0,3324	0,2438	13 410	6 652	598,3	14,643	7,263	0,6533
1900	8,303	6,317	7,493	5,507	4,1185	3,1334	3,7168	2,7316	0,3704	0,2818	0,3343	0,2457	14 240	7 062	635,2	15,032	7,456	0,6706
2000	8,373	6,387	7,535	5,549	4,1533	3,1681	3,7376	2,7525	0,3735	0,2849	0,3362	0,2476	15 070	7 475	672,4	15,407	7,642	0,6873
2100	8,439	6,453	7,577	5,591	4,1860	3,2009	3,7584	2,7733	0,3765	0,2879	0,3380	0,2494	15 910	7 893	709,8	15,769	7,822	0,7035
2200	8,504	6,518	7,617	5,631	4,2182	3,2331	3,7783	2,7931	0,3794	0,2908	0,3398	0,2512	16 760	8 312	747,6	16,118	7,995	0,7191
2300	8,563	6,577	7,657	5,671	4,2475	3,2624	3,7981	2,8180	0,3820	0,2934	0,3416	0,2530	17 610	8 736	785,7	16,457	8,163	0,7342
2400	8,620	6,634	7,696	5,710	4,2758	3,2907	3,8175	2,8323	0,3846	0,2960	0,3433	0,2547	18 470	9 162	823,9	16,785	8,326	0,7488
2500	8,674	6,688	7,735	5,749	4,3026	3,3175	3,8368	2,8517	0,3870	0,2984	0,3451	0,2565	19 340	9 592	862,7	17,103	8,484	0,7630
2600	8,725	6,739	7,772	5,786	4,3279	3,3428	3,8552	2,8700	0,3893	0,3006	0,3467	0,2581	20 210	10 020	901,4	17,411	8,636	0,7768
2700	8,773	6,787	7,808	5,822	4,3517	3,3666	3,8730	2,8879	0,3914	0,3028	0,3483	0,2597	21 080	10 460	940,4	17,710	8,785	0,7901

Таблица 21

Теплоемкость, энтальпия и энтропия окиси углерода CO [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	$\frac{ккал}{моль \cdot град}$				$\frac{ккал}{кГ \cdot град}$				$\frac{ккал}{нм^3 \cdot град}$				$\frac{ккал}{моль}$	$\frac{ккал}{кГ}$	$\frac{ккал}{нм^3}$	$\frac{ккал}{моль \cdot град}$	$\frac{ккал}{кГ \cdot град}$	$\frac{ккал}{нм^3 \cdot град}$
0	6,956	4,970	6,956	4,970	0,2483	0,1774	0,2483	0,1774	0,3103	0,2217	0,3103	0,2217	0	0	0	0	0	0
100	6,989	5,003	6,969	4,983	0,2495	0,1786	0,2488	0,1779	0,3118	0,2232	0,3109	0,2223	696,9	24,88	31,09	2,174	0,0776	0,0970
200	7,081	5,095	6,999	5,013	0,2528	0,1819	0,2499	0,1790	0,3159	0,2273	0,3122	0,2236	1 400	49,98	62,44	3,842	0,1372	0,1714
300	7,226	5,240	7,050	5,064	0,2580	0,1871	0,2517	0,1808	0,3224	0,2338	0,3145	0,2259	2 115	75.51	94,35	5,213	0,1861	0,2326
400	7,398	5,412	7,115	5,129	0,2641	0,1932	0,2540	0,1831	0,3300	0,2414	0,3174	0,2288	2 846	101,6	127,0	6,388	0,2281	0,2850
500	7,573	5,587	7,189	5,203	0,2704	0,1995	0,2567	0,1857	0,3879	0,2492	0,3207	0,2321	3 595	128,4	160,4	7,425	0,2651	0,3312
600	7,739	5,753	7,267	5,281	0,2763	0,2054	0,2594	0,1885	0,3453	0,2567	0,3242	0,2356	4 360	155,6	194,5	8,356	0,2983	0,3728
700	7,888	5,902	7,345	5,359	0,2816	0,2107	0,2622	0,1913	0,3519	0,2633	0,3277	0,2391	5 142	183,5	229,4	9,203	0,3286	0,4108
800	8,019	6,033	7,421	5,435	0,2863	0,2154	0,2649	0,1940	0,3577	0,2691	0,3311	0,2425	5 937	211,9	264,9	9,981	0,3563	0,4453
900	8,134	6,148	7,494	5,508	0,2904	0,2195	0,2675	0,1966	0,3629	0,2743	0,3343	0,2457	6 745	240,8	300,9	10,701	0,3820	0,4774
1000	8,233	6,247	7,563	5,577	0,2939	0,2230	0,2700	0,1991	0,3673	0,2787	0,3374	0,2488	7 563	270,0	337,4	11,370	0,4059	0,5073
1100	8,318	6,332	7,628	5,642	0,2970	0,2261	0,2723	0,2014	0,3711	0,2825	0,3403	0,2517	8 391	299,5	374,3	11,996	0,4283	0,5352
1200	8,393	6,407	7,689	5,703	0,2996	0,2287	0,2745	0,2046	0,3744	0,2858	0,3430	0,2544	9 227	329,4	411,6	12,583	0,4492	0,5614
1300	8,458	6,472	7,745	5,759	0,3020	0,2311	0,2765	0,2056	0,3773	0,2887	0,3455	0,2569	10 070	359,5	449,2	13,137	0,4690	0,5861
1400	8,514	6,528	7,799	5,813	0,3040	0,2330	0,2784	0,2075	0,3798	0,2912	0,3479	0,2593	10 920	389,8	487,1	13,660	0,4877	0,6094
1500	8,564	6,578	7,848	5,862	0,3057	0,2348	0,2802	0,2093	0,3821	0,2935	0,3501	0,2615	11 770	420,3	525,2	14,155	0,5054	0,6315
1600	8,608	6,622	7,894	5,908	0,3073	0,2364	0,2818	0,2109	0,3840	0,2954	0,3522	0,2636	12 630	450,9	563,5	14,626	0,5222	0,6525
1700	8,647	6,661	7,937	5,951	0,3087	0,2378	0,2834	0,2124	0,3858	0,2972	0,3541	0,2655	13 490	481,8	602,0	15,075	0,5382	0,6726
1800	8,682	6,696	7,978	5,992	0,3100	0,2390	0,2848	0,2139	0,3873	0,2987	0,3559	0,2673	14 360	512,6	640,6	15,503	0,5535	0,6917
1900	8,713	6,727	8,016	6,030	0,3111	0,2402	0,2862	0,2153	0,3887	0,3001	0,3576	0,2690	15 230	543,8	679,4	15,913	0,5681	0,7099
2000	8,741	6,755	8,051	6,065	0,3121	0,2412	0,2874	0,2165	0,3900	0,3014	0,3592	0,2706	16 100	574,8	718,4	16,306	0,5821	0,7275
2100	8,767	6,781	8,085	6,099	0,3130	0,2421	0,2886	0,2177	0,3911	0,3025	0,3607	0,2721	16 980	606,1	757,5	16,683	0,5956	0,7443
2200	8,790	6,804	8,116	6,130	0,3138	0,2429	0,2897	0,2188	0,3921	0,3035	0,3621	0,2735	17 860	637,3	796,6	17,045	0,6085	0,7604
2300	8,812	6,826	8,146	6,160	0,3146	0,2437	0,2908	0,2199	0,3931	0,3045	0,3634	0,2748	18 740	668,8	835,8	17,394	0,6210	0,7760
2400	8,832	6,846	8,174	6,188	0,3153	0,2444	0,2918	0,2209	0,3940	0,3054	0,3647	0,2761	19 620	700,3	875,8	17,730	0,6330	0,7910
2500	8,850	6,864	8,201	6,215	0,3160	0,2450	0,2928	0,2219	0,3948	0,3062	0,3659	0,2773	20 500	732,0	914,8	18,055	0,6446	0,8055

Теплоемкость, энтальпия и энтропия окиси азота NO [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	7,160	5,174	7,160	5,174	0,2386	0,1724	0,2386	0,1724	0,3194	0,2308	0,3194	0,2308	0	0	0	0	0	0
100	7,146	5,160	7,143	5,157	0,2381	0,1719	0,2380	0,1718	0,3188	0,2302	0,3187	0,2301	714,3	23,80	31,87	2,229	0,0742	0,0994
200	7,245	5,259	7,165	5,179	0,2414	0,1752	0,2388	0,1726	0,3232	0,2346	0,3197	0,2310	1 433	47,76	63,94	3,936	0,1311	0,1756
300	7,418	5,432	7,220	5,234	5,2472	0,1810	0,2406	0,1744	0,3309	0,2423	0,3221	0,2335	2 166	72,18	96,63	5,343	0,1780	0,2384
400	7,603	5,617	7,292	5,306	0,2534	0,1872	0,2430	0,1768	0,3392	0,2506	0,3253	0,2367	2 917	97,20	130,1	6,549	0,2182	0,2922
500	7,784	5,798	7,373	5,387	0,2594	0,1932	0,2457	0,1795	0,3473	0,2587	0,3289	0,2403	3 686	122,8	164,4	7,614	0,2537	0,2397
600	7,946	5,960	7,455	5,469	0,2648	0,1986	0,2484	0,1822	0,3545	0,2659	0,3326	0,2440	4 473	149,0	199,6	8,571	0,2856	0,3824
700	8,087	6,101	7,536	5,550	0,2695	0,2033	0,2511	0,1849	0,3608	0,2722	0,3362	0,2476	5 275	175,8	235,3	9,443	0,3146	0,4213
800	8,209	6,223	7,613	5,627	0,2736	0,2074	0,2537	0,1875	0,3662	0,2776	0,3396	0,2510	6 090	203,0	271,7	10,243	0,3413	0,4569
900	8,311	6,325	7,684	5,698	0,2770	0,2108	0,2561	0,1899	0,3708	0,2822	0,3428	0,2542	6 916	230,5	308,5	10,979	0,3658	0,4898
1000	8,399	6,413	7,752	5,766	0,2799	0,2137	0,2583	0,1921	0,3747	0,2861	0,3458	0,2572	7 752	258,3	345,8	11,662	0,3885	0,5203
1100	8,473	6,497	7,814	5,828	0,2824	0,2165	0,2604	0,1942	0,3780	0,2899	0,3486	0,2600	8 595	286,4	383,5	12,298	0,4098	0,5486
1200	8,537	6,551	7,872	5,886	0,2845	0,2183	0,2623	0,1961	0,3809	0,2923	0,3512	0,2626	9 446	314,8	421,4	12,897	0,4298	0,5753
1300	8,594	6,608	7,925	5,939	0,2864	0,2202	0,2641	0,1979	0,3834	0,2948	0,3536	0,2650	10 300	343,3	459,7	13,460	0,4486	0,6004
1400	8,644	6,658	7,975	5,989	0,2881	0,2219	0,2658	0,1996	0,3856	0,2970	0,3558	0,2672	11 160	372,1	498,1	13,991	0,4663	0,6242
1500	8,687	6,701	8,021	6,035	0,2895	0,2233	0,2673	0,2011	0,3876	0,2990	0,3578	0,2692	12 030	401,0	536,7	14,495	0,4831	0,6466
1600	8,724	6,738	8,065	6,079	0,2907	0,2245	0,2688	0,2026	0,3892	0,3006	0,3598	0,2712	12 900	430,1	575,7	14,973	0,4990	0,6680
1700	8,757	6,771	8,105	6,119	0,2918	0,2256	0,2701	0,2039	0,3907	0,3021	0,3616	0,2730	13 780	459,2	614,7	15,427	0,5141	0,6883
1800	8,788	6,802	8,142	6,156	0,2928	0,2267	0,2713	0,2051	0,3921	0,3035	0,3632	0,2746	14 660	488,3	653,8	15,890	0,5285	0,7076
1900	8,816	6,830	8,176	6,190	0,2938	0,2276	0,2725	0,2063	0,3933	0,3047	0,3648	0,2762	15 530	517,8	693,1	16,273	0,5423	0,7261
2000	8,843	6,857	8,209	6,223	0,2947	0,2285	0,2736	0,2074	0,3945	0,3059	0,3662	0,2776	16 420	547,2	732,4	16,669	0,5555	0,7437
2100	8,865	6,879	8,240	6,254	0,2954	0,2292	0,2746	0,2084	0,3955	0,3069	0,3676	0,2790	17 300	576,7	772,0	17,051	0,5682	0,7607
2200	8,884	6,898	8,269	6,283	0,2960	0,2299	0,2756	0,2094	0,3963	0,3077	0,3689	0,2803	18 190	606,3	811,6	17,419	0,5805	0,7771
2300	8,903	6,917	8,296	6,310	0,2967	0,2305	0,2765	0,2103	0,3972	0,3086	0,3701	0,2815	19 080	636,0	851,2	17,772	0,5923	0,7929
2400	8,921	6,935	8,321	6,335	0,2973	0,2311	0,2773	0,2111	0,3980	0,3094	0,3712	0,2826	19 970	665,5	890,9	18,113	0,6036	0,8081
2500	8,938	6,952	8,346	6,360	0,2978	0,2317	0,2781	0,2119	0,3988	0,3101	0,3723	0,2837	20 860	695,3	930,8	18,442	0,6146	0,8228
2600	8,955	6,969	8,369	6,383	0,2984	0,2322	0,2789	0,2127	0,3995	0,3109	0,3734	0,2848	21 760	725,1	970,8	18,759	0,6251	0,8369
2700	8,971	6,985	8,391	6,405	0,2989	0,2323	0,2796	0,2134	0,4002	0,3116	0,3743	0,2857	22 660	754,9	1011	19,065	0,6353	0,8506
2800	8,986	7,000	8,412	6,426	0,2994	0,2333	0,2803	0,2141	0,4009	0,3123	0,3753	0,2867	23 550	784,8	1051	19,361	0,6452	0,8638
2900	9,001	7,015	8,432	6,446	0,2999	0,2338	0,2810	0,2148	0,4016	0,3130	0,3762	0,2876	24 450	814,9	1091	19,648	0,6548	0,8766
3000	9,015	7,029	8,451	6,465	0,3004	0,2342	0,2816	0,2154	0,4022	0,3136	0,3770	0,2884	25 350	844,8	1131	19,928	0,6641	0,8891

Теплоёмкость, энтальпия и энтропия гидроксильной группы ОН

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	7,163	5,177	7,163	5,177	0,4212	0,3044	0,4212	0,3044	0,3196	0,2310	0,3196	0,2310	0	0	0	0	0	0
100	7,081	5,095	7,108	5,122	0,4163	0,2995	0,4179	0,3011	0,3159	0,2273	0,3171	0,2287	710,8	41,79	31,71	2,21	0,130	0,099
200	7,046	5,060	7,080	5,094	0,4143	0,2975	0,4163	0,2995	0,3143	0,2257	0,3159	0,2273	1 416	83,26	63,18	3,85	0,226	0,172
300	7,045	5,059	7,070	5,084	0,4142	0,2974	0,4157	0,2989	0,3143	0,2257	0,3154	0,2268	2 121	124,7	94,62	5,22	0,307	0,233
400	7,071	5,085	7,066	5,080	0,4157	0,2989	0,4155	0,2987	0,3155	0,2269	0,3152	0,2266	2 826	166,2	126,1	6,36	0,374	0,284
500	7,128	5,142	7,071	5,085	0,4191	0,3023	0,4157	0,2989	0,3180	0,2294	0,3155	0,2269	3 536	207,9	157,8	7,36	0,433	0,328
600	7,206	5,220	7,087	5,101	0,4237	0,3069	0,4167	0,2999	0,3215	0,2329	0,3162	0,2276	4 252	250,0	189,7	8,25	0,485	0,368
700	7,304	5,318	7,111	5,125	0,4294	0,3126	0,4181	0,3013	0,3259	0,2373	0,3172	0,2286	4 978	292,7	222,0	9,05	0,532	0,404
800	7,412	5,426	7,141	5,155	0,4358	0,3190	0,4199	0,3031	0,3307	0,2421	0,3186	0,2300	5 713	335,9	254,9	9,78	0,575	0,436
900	7,524	5,538	7,177	5,191	0,4424	0,3256	0,4220	0,3052	0,3357	0,2471	0,3202	0,2316	6 459	379,8	288,2	10,45	0,614	0,466
1000	7,635	5,649	7,218	5,232	0,4489	0,3321	0,4244	0,3076	0,3406	0,2520	0,3220	0,2334	7 218	424,4	322,0	11,06	0,650	0,493
1100	7,744	5,758	7,263	5,277	0,4553	0,3385	0,4270	0,3102	0,3455	0,2569	0,3240	0 2354	7 989	469,7	356,4	11,63	0,684	0,519
1200	7,849	5,863	7,309	5,323	0,4615	0,3447	0,4297	0,3129	0,3502	0,2616	0,3261	0,2375	8 771	515,6	391,3	12,17	0,716	0,543
1300	7,949	5,963	7,354	5,368	0,4674	0,3506	0,4324	0,3156	0,3546	0,2660	0,3281	0,2395	9 560	562,1	426,5	12,68	0,746	0,566
1400	8,041	6,055	7,398	5,412	0,4728	0,3560	0,4350	0,3182	0,3587	0,2701	0,3301	0,2415	10 360	609,0	462,1	13,16	0,774	0,587
1500	8,128	6,142	7,447	5,457	0,4779	0,3611	0,4376	0,3208	0,3626	0,2740	0,3321	0,2435	11 160	656,4	498,2	13,62	0,801	0,608
1600	8,210	6,224	7,489	5,503	0,4827	0,3659	0,4403	0,3235	0,3663	0,2777	0,3341	0,2455	11 980	704,5	534,6	14,06	0,827	0,627
1700	8,286	6,300	7,534	5,548	0,4872	0,3704	0,4430	0,3262	0,3697	0,2811	0,3361	0,2475	12 810	753,1	571,4	14,49	0,852	0,646
1800	8,356	6,370	7,577	5,591	0,4913	0,3745	0,4455	0,3287	0,3728	0,2842	0,3380	0,2494	13 640	801,9	608,4	14,90	0,876	0,665
1900	8,421	6,435	7,619	5,633	0,4951	0,3783	0,4480	0,3312	0,3757	0,2871	0,3399	0,2513	14 480	851,2	645,8	15,30	0,900	0,683
2000	8,481	6,495	7,661	5,675	0,4986	0,3818	0,4504	0,3336	0,3784	0,2898	0,3418	0,2532	15 320	900,8	683,6	15,69	0,923	0,700
2100	8,538	6,552	7,702	5,716	0,5020	0,3852	0,4528	0,3360	0,3809	0,2923	0,3436	0,2550	16 170	950,9	721,6	16,07	0,945	0,717
2200	8,591	6,605	7,742	5,756	0,5051	0,3883	0,4552	0,3384	0,3833	0,2947	0,3454	0,2568	17 030	1001	759,9	16,43	0,966	0,733
2300	8,641	6,655	7,781	5,795	0,5081	0,3913	0,4575	0,3407	0,3855	0,2969	0,3471	0,2585	17 900	1052	798,3	16,77	0,986	0,748
2400	8,689	6,703	7,819	5,833	0,5109	0,3941	0,4597	0,3429	0,3876	0,2990	0,3488	0,2602	18 770	1103	837,1	17,10	1,005	0,763
2500	8,737	6,751	7,855	5,869	0,5137	0,3969	0,4618	0,3450	0,3898	0,3012	0,3504	0,2618	19 640	1155	876,0	17,42	1,024	0,777
2600	8,783	6,797	7,890	5,904	0,5194	0,3996	0,4639	0,3471	0,3918	0,3032	0,3520	0,2634	20 510	1206	915,2	17,72	1,042	0,791
2700	8,827	6,841	7,924	5,938	0,5190	0,4022	0,4659	0,3491	0,3938	0,3052	0,3535	0,2649	21 390	1258	954,5	18,01	1,059	0,803
2800	8,870	6,884	7,957	5,971	0,5215	0,4047	0,4678	0,3510	0,3957	0,3071	0,3550	0,2664	22 280	1310	994,0	18,29	1,075	0,816
2900	8,911	6,925	7,989	6,003	0,5239	0,4071	0,4697	0,3529	0,3976	0,3090	0,3564	0,2678	23 170	1362	1034	18,56	1,091	0,828
3000	8,951	6,965	8,020	6,034	0,5263	0,4095	0,4715	0,3547	0,3993	0,3107	0,3578	0,2692	24 060	1415	1073	18,82	1,107	0,840

Теплоемкость, энтальпия и энтропия углекислого газа CO_2 [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / град·нм³
0	8,565	6,579	8,565	6,579	0,1946	0,1495	0,1946	0,1495	0,3821	0,2935	0,3821	0,2935	0	0	0	0	0	0
100	9,603	7,617	9,103	7,117	0,2182	0,1731	0,2068	0,1617	0,4284	0,3398	0,4061	0,3175	910,3	20,68	40,61	2,831	0,0643	0,1263
200	10,435	8,449	9,568	7,582	0,2371	0,1920	0,2174	0,1723	0,4655	0,3769	0,4269	0,3383	1 914	43,48	85,38	5,210	0,1184	0,2324
300	11,110	9,124	9,973	7,987	0,2524	0,2073	0,2266	0,1815	0,4957	0,4071	0,4449	0,3563	2 992	67,98	133,5	7,252	0,1653	0,3246
400	11,670	9,684	10,330	8,344	0,2652	0,2200	0,2347	0,1896	0,5206	0,4320	0,4609	0,3723	4 132	93,88	184,4	9,107	0,2069	0,4063
500	12,137	10,151	10,646	8,660	0,2758	0,2307	0,2419	0,1968	0,5415	0,4529	0,4750	0,3864	5 323	121,0	237,5	10,756	0,2444	0,4799
600	12,528	10,542	10,928	8,942	0,2847	0,2395	0,2483	0,2032	0,5589	0,4703	0,4875	0,3989	6 557	149,0	292,5	12,256	0,2785	0,5468
700	12,856	10,870	11,181	9,195	0,2921	0,2470	0,2541	0,2089	0,5736	0,4850	0,4988	0,4102	7 827	177,9	349,2	13,632	0,3098	0,6082
800	13,131	11,145	11,408	9,422	0,2984	0,2532	0,2592	0,2141	0,5858	0,4972	0,5090	0,4204	9 126	207,4	407,2	14,903	0,3386	0,6649
900	13,364	11,378	11,612	9,626	0,3037	0,2585	0,2638	0,2187	0,5962	0,5076	0,5181	0,4295	10 450	237,4	466,3	16,084	0,3655	0,7176
1000	13,560	11,574	11,797	9,811	0,3081	0,2630	0,2681	0,2229	0,6050	0,5164	0,5263	0,4377	11 800	268,1	526,3	17,185	0,3905	0,7667
1100	13,727	11,741	11,966	9,980	0,3119	0,2668	0,2719	0,2268	0,6124	0,5238	0,5338	0,4452	13 160	299,1	587,2	18,217	0,4139	0,8127
1200	13,870	11,884	12,119	10,133	0,3152	0,2700	0,2754	0,2302	0,6188	0,5302	0,5407	0,4521	14 540	330,5	648,8	19,187	0,4360	0,8560
1300	13,993	12,007	12,258	10,272	0,3180	0,2728	0,2785	0,2334	0,6243	0,5357	0,5469	0,4583	15 940	362,1	711,0	20,102	0,4568	0,8968
1400	14,099	12,113	12,386	10,400	0,3204	0,2752	0,2814	0,2363	0,6290	0,5404	0,5526	0,4640	17 340	394,0	773,6	20,968	0,4764	0,9354
1500	14,190	12,204	12,503	10,517	0,3224	0,2773	0,2841	0,2390	0,6331	0,5445	0,5578	0,4692	18 750	426,2	836,7	21,789	0,4951	0,9721
1600	14,268	12,282	12,611	10,625	0,3242	0,2791	0,2865	0,2414	0,6365	0,5479	0,5626	0,4740	20 180	458,4	900,1	22,569	0,5128	1,0069
1700	14,336	12,350	12,711	10,725	0,3257	0,2806	0,2888	0,2437	0,6396	0,5510	0,5671	0,4785	21 610	491,0	964,1	23,313	0,5297	1,0401
1800	14,395	12,409	12,803	10,817	0,3271	0,2820	0,2909	0,2458	0,6422	0,5536	0,5712	0,4826	23 050	523,6	1028	24,026	0,5459	1,0719
1900	14,445	12,459	12,888	10,902	0,3282	0,2831	0,2928	0,2477	0,6444	0,5558	0,5750	0,4864	24 490	556,3	1093	24,703	0,5613	1,1021
2000	14,487	12,501	12,967	10,981	0,3292	0,2840	0,2946	0,2495	0,6463	0,5577	0,5785	0,4899	25 930	589,2	1157	25,354	0,5761	1,1311
2100	14,522	12,536	13,040	11,054	0,3300	0,2848	0,2963	0,2512	0,6479	0,5592	0,5818	0,4932	27 380	622,2	1222	25,978	0,5903	1,1590
2200	14,550	12,564	13,108	11,122	0,3306	0,2855	0,2978	0,2527	0,6491	0,5605	0,5848	0,4962	28 840	655,2	1287	26,578	0,6039	1,1858
2300	14,571	12,585	13,171	11,185	0,3311	0,2860	0,2993	0,2541	0,6501	0,5615	0,5876	0,4990	30 290	688,4	1351	27,155	0,6170	1,2115
2400	14,584	12,598	13,230	11,244	0,3314	0,2863	0,3006	0,2555	0,6506	0,5620	0,5902	0,5016	31 750	721,4	1416	27,711	0,6297	1,2363
2500	14,590	12,604	13,284	11,298	0,3315	0,2864	0,3018	0,2567	0,6509	0,5623	0,5926	0,5040	33 210	754,5	1482	28,247	0,6418	1,2602

Таблица 25

Теплоемкость, энтальпия и энтропия закиси азота N_2O [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	8,945	6,959	8,945	6,959	0,2032	0,1581	0,2032	0,1581	0,3991	0,3105	0,3991	0,3105	0	0	0	0	0	0
50	9,499	7,513	9,221	7,235	0,2158	0,1707	0,2095	0,1644	0,4238	0,3352	0,4114	0,3228	461,2	10,48	20,57	1,596	0,0363	0,0712
100	9,986	8,000	9,485	7,499	0,2269	0,1817	0,2155	0,1704	0,4455	0,3569	0,4232	0,3346	948,5	21,55	42,32	2,999	0,0681	0,1338
150	10,419	8,433	9,729	7,743	0,2367	0,1916	0,2210	0,1759	0,4648	0,3762	0,4340	0,3454	1 459	33,15	65,10	4,283	0,0973	0,1911
200	10,811	8,825	9,954	7,968	0,2456	0,2005	0,2261	0,1810	0,4823	0,3937	0,4441	0,3555	1 991	45,22	88,82	5,472	0,1243	0,2441
250	11,167	9,181	10,163	8,177	0,2537	0,2086	0,2309	0,1858	0,4982	0,4096	0,4534	0,3648	2 541	57,72	113,4	6,577	0,1494	0,2934
300	11,493	9,507	10,359	8,373	0,2611	0,2160	0,2353	0,1902	0,5127	0,4241	0,4621	0,3735	3 108	70,61	138,7	7,614	0,1730	0,3397
350	11,789	9,803	10,543	8,557	0,2678	0,2227	0,2395	0,1944	0,5259	0,4373	0,4704	0,3818	3 690	83,84	164,6	8,530	0,1938	0,3805
400	12,062	10,076	10,715	8,729	0,2740	0,2289	0,2434	0,1983	0,5381	0,4495	0,4780	0,3894	4 286	97,37	191,2	9,510	0,2161	0,4243
450	12,311	10,325	10,877	8,891	0,2797	0,2346	0,2471	0,2020	0,5492	0,4606	0,4853	0,3967	4 895	111,7	218,4	10,38	0,2132	0,4632
500	12,542	10,556	11,031	9,045	0,2849	0,2398	0,2506	0,2055	0,5595	0,4709	0,4921	0,4035	5 516	125,3	246,1	11,22	0,2548	0,5003
550	12,752	10,766	11,179	9,193	0,2897	0,2446	0,2540	0,2089	0,5689	0,4803	0,4987	0,4101	6 148	139,7	274,3	12,01	0,2728	0,5357
600	12,946	10,960	11,319	9,333	0,2941	0,2490	0,2572	0,2120	0,5776	0,4890	0,5050	0,4164	6 791	154,3	303,0	12,85	0,2918	0,5731
650	13,122	11,136	11,452	9,466	0,2981	0,2530	0,2602	0,2151	0,5854	0,4968	0,5109	0,4223	7 444	169,1	332,1	13,50	0,3066	0,6020
700	13,282	11,296	11,578	9,592	0,3017	0,2566	0,2630	0,2179	0,5926	0,5040	0,5165	0,4279	8 111	184,1	361,6	14,19	0,3224	0,6331
750	13,432	11,446	11,698	9,712	0,3052	0,2600	0,2658	0,2206	0,5992	0,5106	0,5219	0,4333	8 774	199,3	391,4	14,86	0,3376	0,6730
800	13,573	11,587	11,812	9,826	0,3084	0,2632	0,2684	0,2232	0,6055	0,5169	0,5270	0,4384	9 450	214,7	421,6	15,51	0,3523	0,6918
850	13,704	11,718	11,919	9,933	0,3113	0,2662	0,2708	0,2257	0,6114	0,5228	0,5317	0,4431	10 130	230,2	452,0	16,13	0,3665	0,7196
900	13,824	11,838	12,022	10,036	0,3141	0,2689	0,2731	0,2280	0,6167	0,5281	0,5363	0,4477	10 820	245,8	482,7	16,73	0,3801	0,7464
950	13,935	11,949	12,120	10,134	0,3166	0,2715	0,2753	0,2302	0,6217	0,5331	0,5407	0,4521	11 510	261,6	513,7	17,31	0,3932	0,7722
1000	14,038	12,052	12,213	10,227	0,3189	0,2738	0,2775	0,2323	0,6263	0,5377	0,5449	0,4563	12 210	277,5	544,9	17,87	0,4060	0,7973
1050	14,135	12,149	12,302	10,316	0,3211	0,2760	0,2795	0,2344	0,6306	0,5420	0,5488	0,4602	12 920	293,5	576,3	18,41	0,4183	0,8215
1100	14,226	12,240	12,388	10,402	0,3232	0,2789	0,2814	0,2363	0,6347	0,5461	0,5527	0,4641	13 630	309,6	607,9	18,94	0,4303	0,8449
1150	14,312	12,326	12,470	10,484	0,3251	0,2800	0,2833	0,2382	0,6385	0,5499	0,5563	0,4677	14 340	325,8	639,8	19,45	0,4419	0,8677

Таблица 26

Теплоемкость, энтальпия и энтропия сернистого ангидрида SO_2 [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	9,28	7,29	9,28	7,29	0,145	0,114	0,145	0,114	0,414	0,325	0,414	0,325	0	0	0	0	0	0
100	10,13	8,14	9,71	7,72	0,158	0,127	0,152	0,121	0,452	0,363	0,433	0,344	971	15,16	43,32	3,00	0,0468	0,134
200	10,88	8,89	10,11	8,12	0,170	0,139	0,158	0,127	0,485	0,397	0,451	0,362	2 022	31,56	90,21	5,51	0,0860	0,246
300	11,52	9,53	10,48	8,49	0,180	0,149	0,164	0,133	0,514	0,425	0,467	0,379	3 144	49,07	140,3	7,65	0,1194	0,341
400	12,00	10,01	10,80	8,81	0,187	0,156	0,169	0,138	0,535	0,447	0,482	0,393	4 320	67,43	192,7	9,54	0,1489	0,426
500	12,35	10,36	11,08	9,09	0,193	0,162	0,173	0,142	0,551	0,462	0,494	0,406	5 540	86,47	247,2	11,23	0,1753	0,501
600	12,63	10,64	11,31	9,32	0,197	0,166	0,176	0,145	0,563	0,475	0,505	0,416	6 786	105,9	302,7	12,75	0,1990	0,569
700	12,84	10,85	11,52	9,53	0,200	0,169	0,180	0,149	0,573	0,484	0,514	0,425	8 064	125,9	359,8	14,14	0,2206	0,630
800	13,00	11,01	11,69	9,70	0,203	0,172	0,182	0,151	0,580	0,491	0,521	0,433	9 352	146,0	417,2	15,40	0,2404	0,687
900	13,14	11,15	11,85	9,86	0,205	0,174	0,185	0,154	0,586	0,497	0,529	0,440	10 665	166,5	475,8	16,56	0,2585	0,739
1000	13,24	11,25	11,98	9,99	0,207	0,176	0,187	0,156	0,591	0,502	0,534	0,446	11 980	187,0	534,5	17,64	0,2754	0,787
1100	13,32	11,33	12,10	10,11	0,208	0,177	0,189	0,158	0,594	0,505	0,540	0,451	13 310	207,8	594	18,65	0,2911	0,832
1200	13,39	11,40	12,20	10,21	0,209	0,178	0,190	0,159	0,597	0,509	0,544	0,455	14 640	228,5	653	19,59	0,3058	0,874

Таблица 27

Теплоемкость, энтальпия и энтропия сероводорода H_2S [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	8,07	6,08	8,07	6,08	0,237	0,178	0,237	0,178	0,360	0,271	0,360	0,271	0	0	0	0	0	0
100	8,34	6,35	8,20	6,21	0,245	0,186	0,241	0,182	0,372	0,283	0,366	0,277	820	24,1	36,6	2,51	0,074	0,112
200	8,70	6,71	8,36	6,37	0,255	0,197	0,245	0,187	0,388	0,299	0,373	0,283	1 672	49,0	74,6	4,53	0,133	0,202
300	9,12	7,13	8,54	6,55	0,268	0,209	0,251	0,192	0,407	0,318	0,381	0,292	2 562	75,3	114,3	6,23	0,183	0,278
400	9,55	7,56	8,74	6,75	0,280	0,222	0,258	0,198	0,426	0,337	0,390	0,301	3 496	103,2	156,0	7,73	0,227	0,345
500	9,97	7,98	8,94	6,95	0,293	0,234	0,262	0,204	0,445	0,356	0,399	0,310	4 470	131,0	199,5	9,09	0,267	0,406
600	10,37	8,38	9,15	7,16	0,304	0,246	0,268	0,210	0,463	0,374	0,408	0,319	5 490	160,8	244,8	10,33	0,303	0,461
700	10,75	8,76	9,35	7,86	0,315	0,257	0,274	0,216	0,480	0,391	0,417	0,328	6 545	191,8	291,9	11,47	0,336	0,512
800	11,08	9,09	9,55	7,56	0,325	0,267	0,280	0,222	0,494	0,406	0,426	0,337	7 640	224,0	340,8	12,54	0,368	0,559
900	11,38	9,39	9,73	7,74	0,334	0,276	0,285	0,227	0,508	0,419	0,434	0,345	8 757	256,5	390,6	13,54	0,397	0,604
1000	11,65	9,66	9,91	7,92	0,342	0,283	0,291	0,232	0,520	0,431	0,442	0,353	9 910	291,0	442,0	14,48	0,425	0,646
1100	11,88	9,89	10,08	8,09	0,349	0,290	0,296	0,237	0,530	0,441	0,450	0,361	11 088	325,6	494,7	15,37	0,451	0,686
1200	12,08	10,09	10,23	8,24	0,354	0,296	0,300	0,242	0,531	0,450	0,456	0,368	12 276	360,0	547,7	16,21	0,475	0,723

Таблица 28

Теплоемкость, энтальпия и энтропия сероуглерода CS_2 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μI	I	I'	μs	s	s'
	ккал/моль·град				ккал/кГ·град				ккал/нм³·град				ккал/моль	ккал/кГ	ккал/нм³	ккал/моль·град	ккал/кГ·град	ккал/нм³·град
0	10,63	8,64	10,63	8,64	0,140	0,113	0,140	0,113	0,474	0,385	0,474	0,385	0	0	0	0	0	0
100	11,62	9,63	11,15	9,16	0,153	0,126	0,146	0,120	0,518	0,430	0,497	0,409	1 115	14,64	49,74	3,45	0,0453	0,154
200	12,35	10,36	11,58	9,59	0,162	0,136	0,152	0,126	0,551	0,462	0,517	0,428	2 316	30,42	103,3	6,31	0,0829	0,282
300	12,87	10,88	11,92	9,93	0,169	0,143	0,157	0,130	0,574	0,485	0,532	0,443	3 576	46,98	159,5	8,73	0,1147	0,389
400	13,27	11,28	12,21	10,22	0,174	0,148	0,160	0,134	0,592	0,503	0,545	0,456	4 884	64,16	217,9	10,82	0,1421	0,483
500	13,57	11,58	12,45	10,46	0,178	0,152	0,163	0,137	0,605	0,517	0,555	0,467	6 225	81,75	277,7	12,69	0,1667	0,567
600	13,80	11,81	12,66	10,67	0,181	0,155	0,166	0,140	0,616	0,527	0,565	0,476	7 596	99,78	338,9	14,35	0,1885	0,641
700	13,97	11,98	12,84	10,85	0,183	0,157	0,169	0,142	0,623	0,534	0,573	0,484	8 988	118,0	401,0	15,85	0,2082	0,708
800	14,11	12,12	12,99	11,00	0,185	0,159	0,171	0,144	0,629	0,541	0,579	0,491	10 390	136,5	463,6	17,22	0,2262	0,769
900	14,22	12,23	13,12	11,13	0,187	0,161	0,172	0,146	0,634	0,546	0,585	0,496	11 810	155,1	526,8	18,49	0,2429	0,825
1000	14,32	12,33	13,23	11,24	0,188	0,162	0,174	0,148	0,639	0,550	0,590	0,501	13 230	173,8	590,2	19,66	0,2582	0,878
1100	14,40	12,41	13,34	11,35	0,189	0,163	0,175	0,149	0,642	0,554	0,595	0,506	14 670	192,7	655	20,75	0,2725	0,926
1200	14,46	12,47	13,43	11,44	0,190	0,164	0,176	0,150	0,645	0,556	0,599	0,510	16 120	211,7	719	21,77	0,2859	0,972

Таблица 29

Теплоемкость, энтальпия и энтропия сероокиси углерода COS [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μI	I	I'	μs	s	s'
	ккал/моль·град				ккал/кГ·град				ккал/нм³·град				ккал/моль	ккал/кГ	ккал/нм³	ккал/моль·град	ккал/кГ·град	ккал/нм³·град
0	9,62	7,63	9,62	7,63	0,160	0,127	0,160	0,127	0,429	0,340	0,429	0,340	0	0	0	0	0	0
100	10,70	8,71	10,18	8,19	0,178	0,145	0,169	0,136	0,477	0,389	0,454	0,365	1 018	16,95	45,42	3,17	0,0528	0,141
200	11,49	9,50	10,65	8,66	0,191	0,158	0,177	0,144	0,513	0,424	0,475	0,386	2 130	35,46	95,03	5,80	0,0966	0,258
300	12,06	10,07	11,03	9,04	0,201	0,168	0,184	0,150	0,538	0,449	0,492	0,403	3 309	55,08	147,6	8,06	0,1342	0,359
400	12,53	10,54	11,35	9,36	0,209	0,175	0,189	0,156	0,559	0,470	0,506	0,418	4 540	75,57	202,5	10,05	0,1673	0,448
500	12,87	10,88	11,62	9,63	0,214	0,181	0,193	0,160	0,574	0,485	0,518	0,430	5 810	96,71	259,2	11,81	0,1964	0,526
600	13,17	11,18	11,85	9,86	0,219	0,186	0,197	0,164	0,588	0,499	0,529	0,440	7 110	118,4	317,2	13,39	0,2227	0,597
700	13,42	11,43	12,06	10,07	0,223	0,190	0,201	0,168	0,599	0,510	0,538	0,449	8 442	140,5	376,6	14,82	0,2467	0,661
800	13,62	11,63	12,24	10,25	0,227	0,194	0,204	0,171	0,608	0,519	0,546	0,457	9 792	163,0	436,9	16,14	0,2687	0,720
900	13,78	11,80	12,40	10,41	0,229	0,196	0,206	0,173	0,615	0,526	0,553	0,464	11 160	185,8	497,9	17,37	0,2892	0,775
1000	13,93	11,94	12,55	10,56	0,232	0,199	0,209	0,176	0,621	0,533	0,560	0,471	12 550	208,9	569,9	18,51	0,3081	0,825
1100	14,05	12,06	12,68	10,69	0,234	0,201	0,211	0,178	0,627	0,538	0,566	0,477	13 950	232,2	622	19,57	0,3258	0,873
1200	14,14	12,15	12,80	10,81	0,235	0,202	0,213	0,180	0,631	0,542	0,571	0,482	15 360	255,7	685	20,56	0,3423	0,917

Теплоемкость, энтальпия и энтропия водяного пара H_2O [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал/моль·град				ккал/кГ·град				ккал/нм³·град				ккал/моль	ккал/кГ	ккал/нм³	ккал/моль·град	ккал/кГ·град	ккал/нм³·град
0	8,001	6,015	8,001	6,015	0,4441	0,3339	0,4441	0,3339	0,3569	0,2684	0,3569	0,2684	0	0	0	0	0	0
100	8,134	6,148	8,059	6,073	0,4515	0,3413	0,4473	0,3371	0,3629	0,2743	0,3595	0,2709	805,9	44,73	35,95	2,481	0,1377	0,1107
200	8,351	6,365	8,149	6,163	0,4635	0,3533	0,4523	0,3421	0,3726	0,2840	0,3636	0,2750	1 630	90,46	72,72	4,446	0,2468	0,1984
300	8,607	6,621	8,258	6,272	0,4778	0,3675	0,4584	0,3481	0,3840	0,2954	0,3684	0,2798	2 477	137,5	110,5	6,066	0,3367	0,2707
400	8,883	6,897	8,381	6,395	0,4931	0,3828	0,4652	0,3550	0,3963	0,3077	0,3739	0,2853	3 352	186,1	149,6	7,471	0,415	0,333
500	9,173	7,187	8,510	6,524	0,5092	0,3989	0,4724	0,3621	0,4092	0,3206	0,3797	0,2911	4 255	236,2	189,9	8,720	0,484	0,389
600	9,473	7,487	8,645	6,659	0,5258	0,4156	0,4799	0,3696	0,4226	0,3340	0,3857	0,2971	5 187	287,9	231,4	9,854	0,547	0,440
700	9,781	7,795	8,787	6,801	0,5429	0,4327	0,4877	0,3775	0,4364	0,3478	0,3920	0,3034	6 151	341,4	274,4	10,899	0,605	0,486
800	10,091	8,105	8,931	6,945	0,5601	0,4499	0,4957	0,3855	0,4502	0,3616	0,3984	0,3098	7 145	396,6	318,7	11,870	0,659	0,530
900	10,393	8,407	9,078	7,092	0,5769	0,4666	0,5039	0,3937	0,4637	0,3751	0,4050	0,3164	8 170	453,5	364,5	12,781	0,709	0,570
1000	10,682	8,696	9,224	7,238	0,5929	0,4827	0,5120	0,4018	0,4766	0,3880	0,4115	0,3229	9 224	512,0	411,5	13,642	0,757	0,609
1100	10,953	8,967	9,369	7,383	0,6080	0,4977	0,5200	0,4098	0,4886	0,4000	0,4180	0,3294	10 310	572,0	459,8	14,459	0,803	0,645
1200	11,205	9,219	9,512	7,526	0,6220	0,5113	0,5280	0,4177	0,4999	0,4113	0,4244	0,3358	11 410	633,6	509,3	15,237	0,846	0,680
1300	11,440	9,454	9,651	7,665	0,6350	0,5248	0,5357	0,4255	0,5104	0,4218	0,4306	0,3420	12 550	696,4	559,8	15,98	0,887	0,712
1400	11,656	9,670	9,787	7,801	0,6470	0,5368	0,5432	0,4330	0,5200	0,4314	0,4366	0,3480	13 700	760,5	611,2	16,69	0,926	0,744
1500	11,856	9,870	9,918	7,932	0,6581	0,5479	0,5505	0,4403	0,5289	0,4403	0,4425	0,3539	14 880	825,8	663,8	17,37	0,964	0,774
1600	12,040	10,054	10,045	8,059	0,6683	0,5581	0,5576	0,4473	0,5371	0,4485	0,4481	0,3595	16 070	892,1	717,0	18,03	1,001	0,804
1700	12,213	10,227	10,169	8,183	0,6779	0,5677	0,5644	0,4542	0,5449	0,4563	0,4537	0,3651	17 290	959,6	771,3	18,66	1,036	0,832
1800	12,368	10,382	10,287	8,301	0,6865	0,5763	0,5710	0,4608	0,5518	0,4632	0,4589	0,3703	18 520	1027,8	826,1	19,27	1,069	0,859
1900	12,510	10,524	10,399	8,413	0,6944	0,5842	0,5772	0,4670	0,5581	0,4695	0,4639	0,3753	19 760	1096,7	881,5	19,86	1,102	0,885
2000	12,642	10,656	10,508	8,522	0,7017	0,5915	0,5833	0,4730	0,5640	0,4754	0,4688	0,3802	21 020	1168,5	937,6	20,43	1,134	0,911
2100	12,766	10,780	10,613	8,627	0,7086	0,5984	0,5891	0,4789	0,5695	0,4809	0,4735	0,3849	22 290	1237,1	994,3	20,97	1,164	0,935
2200	12,881	10,895	10,713	8,727	0,7150	0,6047	0,5946	0,4844	0,5747	0,4861	0,4779	0,3893	23 570	1308,2	1051,5	21,50	1,193	0,958
2300	12,986	11,000	10,809	8,823	0,7208	0,6106	0,6000	0,4897	0,5793	0,4907	0,4822	0,3936	24 860	1380,0	1109,1	22,01	1,221	0,981
2400	13,084	11,098	10,902	8,916	0,7263	0,6160	0,6051	0,4949	0,5837	0,4951	0,4864	0,3978	26 165	1452,3	1167,3	22,51	1,249	1,003
2500	13,175	11,189	10,991	9,005	0,7313	0,6211	0,6101	0,4998	0,5878	0,4922	0,4903	0,4017	27 480	1525,2	1225,9	22,99	1,276	1,025
2600	13,262	11,276	11,078	9,092	0,7361	0,6259	0,6149	0,5047	0,5917	0,5031	0,4942	0,4056	28 810	1598,8	1285,0	23,45	1,301	1,045
2700	13,343	11,357	11,161	9,175	0,7406	0,6304	0,6195	0,5093	0,5953	0,5067	0,4979	0,4093	30 140	1672,7	1344,4	23,89	1,326	1,065
2800	13,420	11,434	11,240	9,254	0,7449	0,6347	0,6239	0,5137	0,5987	0,5101	0,5015	0,4129						
2900	13,492	11,506	11,316	9,330	0,7489	0,6387	0,6281	0,5179	0,6019	0,5133	0,5048	0,4162						

Таблица 31

Теплоёмкость, энтальпия и энтропия метана CH_4 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μI	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	8,297	6,311	8,297	6,311	0,5172	0,3934	0,5172	0,3934	0,3702	0,2816	0,3702	0,2816	0	0	0	0	0	0
100	9,382	7,396	8,791	6,805	0,5848	0,4610	0,5480	0,4242	0,4186	0,3300	0,3922	0,3036	879,1	54,80	39,22	2,70	0,168	0,121
200	10,755	8,769	9,417	7,431	0,6704	0,5466	0,5870	0,4632	0,4798	0,3912	0,4201	0,3315	1 883	117,4	84,02	5,08	0,317	0,227
300	12,167	10,181	10,097	8,111	0,7584	0,6346	0,6294	0,5056	0,5428	0,4542	0,4505	0,3619	3 029	188,8	135,1	7,28	0,454	0,325
400	13,524	11,538	10,791	8,805	0,8430	0,7192	0,6727	0,5489	0,6034	0,5147	0,4814	0,3928	4 316	269,1	192,6	9,35	0,583	0,417
500	14,774	12,788	11,459	9,473	0,9210	0,7972	0,7143	0,5905	0,6591	0,5705	0,5112	0,4226	5 729	357,1	255,6	11,30	0,704	0,504
600	15,912	13,926	12,103	10,117	0,9919	0,8681	0,7545	0,6307	0,7099	0,6213	0,5400	0,4514	7 262	452,7	324,0	13,17	0,821	0,588
700	16,941	14,955	12,725	10,739	1,0560	0,9322	0,7932	0,6694	0,7558	0,6672	0,5677	0,4791	8 907	555,2	397,4	14,95	0,932	0,667
800	17,853	15,867	13,352	11,366	1,1129	0,9891	0,8323	0,7085	0,7965	0,7079	0,5957	0,5071	10 680	665,8	476,6	16,62	1,036	0,742
900	18,670	16,684	13,932	11,946	1,1638	1,0400	0,8685	0,7447	0,8329	0,7443	0,6216	0,5330	12 540	781,6	559,4	18,24	1,137	0,814
1000	19,393	17,407	14,451	12,465	1,2089	1,0851	0,9008	0,7770	0,8652	0,7766	0,6447	0,5561	14 450	900,8	644,7	19,79	1,233	0,883
1100	20,026	18,040	14,917	12,931	1,2483	1,1245	0,9299	0,8061	0,8934	0,8048	0,6655	0,5769	16 410	1023	732,0	21,30	1,328	0,951
1200	20,566	18,580	15,328	13,342	1,2820	1,1582	0,9555	0,8317	0,9175	0,8289	0,6838	0,5952	18 390	1147	820,6	22,75	1,418	1,015

Таблица 32

Теплоёмкость, энтальпия и энтропия этана C_2H_6 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μI	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	11,830	9,844	11,830	9,844	0,3934	0,3274	0,3934	0,3274	0,5278	0,4392	0,5278	0,4392	0	0	0	0	0	0
100	14,849	12,863	13,356	11,370	0,4938	0,4278	0,4442	0,3781	0,6625	0,5739	0,5959	0,5073	1 336	44,42	59,59	4,15	0,138	0,185
200	17,883	15,897	14,855	12,869	0,5947	0,5287	0,4940	0,4280	0,7978	0,7092	0,6627	0,5741	2 971	98,80	132,5	8,02	0,267	0,358
300	20,610	18,624	16,297	14,311	0,6854	0,6194	0,5420	0,4759	0,9195	0,8309	0,7271	0,6385	4 889	162,6	218,1	11,69	0,389	0,522
400	23,081	21,095	17,713	15,727	0,7676	0,7016	0,5891	0,5230	1,0297	0,9411	0,7902	0,7016	7 085	235,6	316,1	15,21	0,506	0,679
500	25,271	23,285	19,019	17,033	0,8405	0,7744	0,6325	0,5665	1,1274	1,0388	0,8485	0,7599	9 509	316,2	424,2	18,58	0,618	0,829
600	27,197	25,211	20,224	18,238	0,9045	0,8385	0,6726	0,6066	1,2134	1 1248	0,9023	0,8137	12 130	403,6	541,4	21,77	0,724	0,971
700	28,885	26,899	21,342	19,356	0,9607	0,8946	0,7098	0,6437	1,2887	1,2001	0,9521	0,8635	14 940	496,9	666,5	24,82	0,825	1,107
800	30,275	28,289	22,383	20,397	1,0069	0,9408	0,7444	0,6784	1,3507	1,2621	0,9986	0,9100	17 910	595,5	798,9	27,69	0,921	1,235
900	31,519	29,533	23,351	21,365	1,0483	0,9822	0,7765	0,7106	1,4062	1,3176	1,0418	0,9532	21 020	698,8	937,6	30,44	1,012	1,358
1000	32,663	30,677	24,249	22,263	1,0863	1,0202	0,8065	0,7404	1,4572	1,3686	1,0818	0,9932	24 250	806,5	1082	33,09	1,100	1,476
1100	33,703	31,717	25,075	23,089	1,1209	1,0548	0,8339	0,7679	1,5036	1,4150	1,1187	1,0301	27 580	917,3	1231	35,63	1,185	1,590
1200	34,642	32,656	25,834	23,848	1,1521	1,0861	0,8592	0,7931	1,5455	1,4569	1,1525	1,0639	31 000	1031	1383	38,07	1,266	1,699

Таблица 33

Теплоемкость, энтальпия и энтропия пропана C_3H_8 [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	16,32	14,33	16,32	14,33	0,3701	0,3250	0,3701	0,3250	0,7281	0,6393	0,7281	0,6393	0	0	0	0	0	0
100	21,24	19,25	18,79	16,80	0,4817	0,4366	0,4261	0,3810	0,9476	0,8588	0,8383	0,7495	1 879	42,61	83,83	5,80	0,131	0,258
200	25,89	23,90	21,23	19,24	0,5871	0,5420	0,4815	0,4363	1,1550	1,0663	0,9471	0,8584	4 246	96,30	189,4	11,39	0,258	0,508
300	29,85	27,86	23,39	21,40	0,6770	0,6318	0,5305	0,4853	1,3317	1,2429	1,0435	0,9547	7 017	159,1	313,0	16,69	0,378	0,744
400	33,29	31,30	25,48	23,49	0,7550	0,7098	0,5779	0,5327	1,4852	1,3964	1,1368	1,0480	10 190	231,2	454,7	21,79	0,494	0,972
500	36,32	34,33	27,27	25,28	0,8237	0,7786	0,6184	0,5733	1,6204	1,5316	1,2166	1,1278	13 630	309,2	608,3	26,61	0,603	1,287
600	38,94	36,95	29,08	27,09	0,8831	0,8380	0,6595	0,6144	1,7373	1,6485	1,2974	1,2086	17 450	395,7	778,4	30,22	0,685	1,448
700	41,24	39,25	30,64	28,65	0,9353	0,8901	0,6949	0,6497	1,8399	1,7511	1,3670	1,2782	21 450	486,4	956,9	35,58	0,807	1,687
800	43,10	41,11	32,06	30,07	0,9775	0,9323	0,7271	0,6819	1,9228	1,8341	1,4803	1,3415	25 650	581,7	1144	39,65	0,899	1,869
900	44,76	42,77	33,86	31,37	1,0151	0,9700	0,7566	0,7114	1,9969	1,9081	1,4883	1,3995	30 020	680,9	1339	43,55	0,987	2,043
1000	46,28	44,29	34,59	32,60	1,0496	1,0044	0,7845	0,7393	2,0647	1,9739	1,5432	1,4544	34 590	784,5	1543	47,29	1,072	2,209
1100	47,67	45,68	35,75	33,76	1,0811	1,0360	0,8108	0,7656	2,1267	2,0380	1,5949	1,5062	39 320	891,9	1754	50,88	1,154	2,370
1200	48,92	46,93	36,84	34,85	1,1094	1,0643	0,8355	0,7904	2,1825	2,0937	1,6436	1,5548	44 210	1003	1972	54,31	1,231	2,523

Таблица 34

Теплоемкость, энтальпия и энтропия этилена (этена) C_2H_4 [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	9,78	7,79	9,78	7,79	0,3486	0,2777	0,3486	0,2777	0,4363	0,3475	0,4363	0,3475	0	0	0	0	0	0
100	12,24	10,25	11,04	9,05	0,4363	0,3654	0,3936	0,3226	0,5461	0,4573	0,4925	0,4037	1 104	39,36	49,25	3,45	0,123	0,153
200	14,58	12,59	12,22	10,23	0,5197	0,4488	0,4356	0,3647	0,6505	0,5617	0,5452	0,4564	2 444	87,12	109,0	6,61	0,235	0,294
300	16,60	14,61	13,36	11,37	0,5918	0,5208	0,4763	0,4053	0,7406	0,6518	0,5960	0,5073	4 008	142,9	178,0	9,58	0,341	0,427
400	18,33	16,34	14,38	12,38	0,6534	0,5825	0,5126	0,4417	0,8178	0,7290	0,6415	0,5528	5 752	205,0	256,6	12,39	0,441	0,552
500	19,82	17,83	15,33	13,34	0,7065	0,6356	0,5465	0,4755	0,8842	0,7955	0,6839	0,5951	7 665	273,2	341,9	15,04	0,536	0,670
600	21,13	19,14	16,20	14,21	0,7532	0,6823	0,5775	0,5066	0,9427	0,8539	0,7227	0,6340	9 720	346,5	433,6	17,52	0,624	0,781
700	22,28	20,29	16,97	14,98	0,7942	0,7233	0,6049	0,5340	0,9940	0,9052	0,7571	0,6683	11 880	423,4	530,0	19,88	0,708	0,886
800	23,27	21,28	17,71	15,72	0,8295	0,7586	0,6313	0,5604	1,0382	0,9494	0,7901	0,7013	14 170	505,0	632,1	22,11	0,788	0,986
900	24,15	22,16	18,37	16,38	0,8609	0,7900	0,6549	0,5839	1,0774	0,9886	0,8196	0,7308	16 530	539,4	737,6	24,22	0,863	1,080
1000	24,93	22,94	18,99	17,00	0,8887	0,8178	0,6770	0,6060	1,1122	1,0234	0,8472	0,7584	18 990	677,0	847,2	26,23	0,935	1,170
1100	25,60	23,61	19,57	17,58	0,9126	0,8416	0,6976	0,6267	1,1421	1,0533	0,8731	0,7843	21 530	767,4	960,4	28,14	1,003	1,255
1200	26,19	24,20	20,09	18,10	0,9336	0,8627	0,7162	0,6452	1,1684	1,0796	0,8963	0,8075	24 110	859,4	1075,6	29,97	1,068	1,337

Таблица 35

Теплоемкость, энтальпия и энтропия ацетилена (этина) C_2H_2 [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	10,01	8,02	10,01	8,02	0,38447	0,3080	0,38447	0,3080	0,4466	0,3578	0,4466	0,3578	0	0	0	0	0	0
100	11,63	9,64	10,956	8,970	0,44669	0,3703	0,42080	0,3445	0,5189	0,4301	0,48879	0,4002	1 095,6	42,080	48,879	3,384	0,1300	0,1510
200	12,71	10,72	11,588	9,602	0,48817	0,4117	0,44508	0,3688	0,5670	0,4783	0,51698	0,4284	2 317,6	89,016	103,40	6,280	0,2412	0,2802
300	13,52	11,53	12,104	10,118	0,51928	0,4428	0,46489	0,38862	0,6032	0,5144	0,54000	0,45140	3 631,2	139,47	162,00	8,798	0,3379	0,3925
400	14,19	12,20	12,548	10,562	0,54501	0,4686	0,48195	0,40567	0,6331	0,5443	0,55981	0,47121	5 019,2	192,78	223,92	11,029	0,4236	0,4920
500	14,777	12,791	12,936	10,950	0,56756	0,49128	0,49685	0,42057	0,65926	0,57065	0,57712	0,48852	6 468,0	248,42	288,56	13,036	0,5007	0,5816
600	15,305	13,319	13,289	11,303	0,58784	0,51156	0,51041	0,43413	0,68281	0,59421	0,59287	0,50427	7 973,4	306,25	355,72	14,868	0,5711	0,6633
700	15,789	13,803	13,614	11,628	0,60643	0,53015	0,52289	0,44661	0,70441	0,61580	0,60737	0,51877	9 529,8	366,02	425,16	16,555	0,6359	0,7386
800	16,230	14,244	13,917	11,931	0,62337	0,54709	0,53453	0,45825	0,72408	0,63548	0,62089	0,53229	11 134	427,62	496,71	18,123	0,6961	0,8085
900	16,632	14,646	14,198	12,212	0,63881	0,56253	0,54532	0,46904	0,74202	0,65341	0,63343	0,54482	12 778	490,79	570,09	19,589	0,7524	0,8739
1000	16,996	15,010	14,459	12,473	0,65279	0,57651	0,55535	0,47907	0,75826	0,66965	0,64507	0,55647	14 459	555,35	645,07	20,965	0,8053	0,9353
1100	17,325	15,339	14,706	12,720	0,66542	0,58915	0,56483	0,48855	0,77293	0,68433	0,65609	0,56749	16 177	621,31	721,70	22,263	0,8551	0,9932
1200	17,619	15,633	14,938	12,952	0,67672	0,60044	0,57374	0,49746	0,78605	0,69745	0,66644	0,57784	17 926	688,49	799,73	23,493	0,9024	1,0481

Таблица 36

Теплоемкость, энтальпия и энтропия 1,3-бутадиена C_4H_6 [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	17,69	15,70	17,69	15,70	0,3271	0,2903	0,3271	0,2903	0,789	0,700	0,789	0,700	0	0	0	0	0	0
100	22,99	21,00	20,53	18,54	0,4250	0,3883	0,3796	0,3428	1,026	0,937	0,916	0,827	2 053	37,96	91,6	6,32	0,1168	0,2820
200	27,46	25,47	22,93	20,94	0,5077	0,4709	0,4239	0,3871	1,225	1,136	1,023	0,934	4 586	84,78	204,6	12,30	0,2274	0,5488
300	31,11	29,12	25,06	23,07	0,5752	0,5384	0,4633	0,4265	1,388	1,299	1,118	1,029	7 518	139,0	335,4	17,90	0,3309	0,7986
400	33,85	31,86	26,91	24,92	0,6258	0,5890	0,4975	0,4607	1,510	1,421	1,201	1,112	10 760	199,0	480,4	23,12	0,4274	1,0315
500	36,24	34,25	28,55	26,56	0,6700	0,6332	0,5278	0,4910	1,617	1,528	1,274	1,185	14 280	263,9	637,0	27,98	0,5173	1,2483
600	38,28	36,29	30,01	28,02	0,7077	0,6709	0,5548	0,5180	1,708	1,619	1,339	1,250	18 010	332,9	803,4	32,51	0,6010	1,4504
700	40,05	38,06	31,32	29,33	0,7405	0,7037	0,5791	0,5423	1,787	1,698	1,397	1,308	21 920	405,4	977,9	36,76	0,6796	1,6400
800	41,61	39,62	32,51	30,52	0,7693	0,7325	0,6011	0,5643	1,856	1,768	1,450	1,362	26 010	480,9	1160	40,75	0,7534	1,8180
900	42,96	40,97	33,60	31,61	0,7943	0,7575	0,6212	0,5844	1,917	1,828	1,499	1,410	30 240	559,1	1349	44,52	0,8231	1,9862
1000	44,15	42,16	34,60	32,61	0,8163	0,7795	0,6397	0,6029	1,970	1,881	1,544	1,455	34 600	639,7	1544	48,08	0,8889	2,1451
1100	45,19	43,20	35,51	33,52	0,8355	0,7987	0,6565	0,6197	2,016	1,927	1,584	1,495	39 060	722,2	1742	51,46	0,9514	2,2959
1200	46,09	44,10	36,35	34,36	0,8521	0,8153	0,6720	0,6353	2,056	1,967	1,622	1,533	43 620	806,4	1946	54,67	1,0107	2,4391

Таблица 37

Теплоемкость, энтальпия и энтропия бензола C_6H_6 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	17,60	15,61	17,60	15,61	0,2253	0,1998	0,2253	0,1998	0,7852	0,6964	0,7852	0,6964	0	0	0	0	0	0
100	24,91	22,92	21,37	19,38	0,3189	0,2934	0,2736	0,2481	1,1113	1,0225	0,9434	0,8646	2 137	27,36	95,34	6,60	0,085	0,294
200	31,27	29,28	24,73	22,74	0,4003	0,3749	0,3166	0,2911	1,3951	1,3063	1,1033	1,0145	4 946	63,32	220,7	13,26	0,170	0,591
300	36,50	34,51	27,84	25,85	0,4673	0,4418	0,3564	0,3309	1,6284	1,5396	1,2420	1,1533	8 352	106,9	372,6	19,76	0,253	0,881
400	40,72	38,73	30,55	28,56	0,5213	0,4958	0,3911	0,3656	1,8167	1,7279	1,3629	1,2742	12 220	156,4	545,2	25,97	0,333	1,158
500	44,20	42,21	32,93	30,94	0,5659	0,5404	0,4216	0,3961	1,9719	1,8831	1,4691	1,3803	16 460	210,8	734,5	31,86	0,408	1,421
600	47,09	45,10	35,07	33,08	0,6029	0,5774	0,4490	0,4235	2,1009	2,0121	1,5646	1,4758	21 040	269,4	938,8	37,40	0,479	1,668
700	49,54	47,55	36,96	34,97	0,6342	0,6088	0,4732	0,4477	2,2102	2,1214	1,6489	1,5601	25 870	331,2	1154	42,65	0,546	1,902
800	51,62	49,63	38,66	36,67	0,6609	0,6354	0,4950	0,4695	2,3030	2,2142	1,7248	1,6360	30 930	396,0	1380	47,60	0,609	2,123
900	53,38	51,39	40,20	38,24	0,6834	0,6579	0,5147	0,4892	2,3815	2,2927	1,7935	1,7047	36 180	463,2	1614	52,27	0,669	2,331
1000	54,90	52,91	41,60	39,61	0,7029	0,6774	0,5326	0,5071	2,4493	2,3605	1,8559	1,7671	41 600	532,6	1856	56,71	0,726	2,530
1100	56,21	54,22	42,87	40,88	0,7196	0,6942	0,5489	0,5234	2,5077	2,4190	1,9126	1,8238	47 160	603,8	2104	60,91	0,780	2,717
1200	57,33	55,34	44,01	42,02	0,7340	0,7085	0,5634	0,5380	2,5577	2,4689	1,9634	1,8747	52 810	676,1	2356	64,90	0,831	2,895

Таблица 38

Теплоемкость, энтальпия и энтропия пропилена (пропена) C_3H_6 [4]

t° C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал / моль·град				ккал / кГ·град				ккал / нм³·град				ккал / моль	ккал / кГ	ккал / нм³	ккал / моль·град	ккал / кГ·град	ккал / нм³·град
0	14,33	12,34	14,33	12,34	0,3406	0,2933	0,3406	0,2933	0,6393	0,5505	0,6393	0,5505	0	0	0	0	0	0
100	18,09	16,10	16,32	14,33	0,4299	0,3826	0,3878	0,3406	0,8071	0,7183	0,7281	0,6393	1 632	38,78	72,81	5,04	0,121	0,225
200	21,71	19,72	18,09	16,10	0,5159	0,4686	0,4299	0,3826	0,9686	0,8798	0,8071	0,7183	3 618	85,98	161,4	9,75	0,232	0,435
300	24,89	22,90	19,84	17,85	0,5915	0,5442	0,4715	0,4242	1,1104	1,0217	0,8851	0,7964	5 952	141,4	265,5	14,20	0,338	0,633
400	27,67	25,68	21,44	19,45	0,6576	0,6103	0,5095	0,4622	1,2345	1,1457	0,9565	0,8677	8 576	203,8	382,6	18,43	0,438	0,822
500	30,07	28,08	22,93	20,94	0,7146	0,6673	0,5449	0,4976	1,3415	1,2527	1,0230	0,9342	11 460	272,4	511,5	22,42	0,533	1,000
600	32,16	30,17	24,30	22,31	0,7643	0,7170	0,5775	0,5302	1,4348	1,3460	1,0841	0,9953	14 580	346,5	650,5	26,22	0,624	1,169
700	33,99	32,00	25,57	23,58	0,8078	0,7605	0,6077	0,5604	1,5164	1,4276	1,1408	1,0520	17 900	425,4	798,6	29,81	0,709	1,329
800	35,58	33,59	26,72	24,73	0,8456	0,7983	0,6350	0,5877	1,5874	1,4986	1,1921	1,1033	21 380	508,0	953,7	33,21	0,790	1,481
900	36,96	34,97	27,79	25,80	0,8784	0,8311	0,6604	0,6131	1,6489	1,5601	1,2398	1,1510	25 010	594,4	1116	36,43	0,866	1,625
1000	38,17	36,18	28,76	26,77	0,9071	0,8598	0,6835	0,6362	1,7029	1,6141	1,2831	1,1943	28 760	683,5	1283	39,51	0,929	1,762
1100	39,22	37,23	29,66	27,67	0,9321	0,8848	0,7049	0,6576	1,7497	1,6610	1,3232	1,2345	32 630	775,4	1455	42,44	1,009	1,893
1200	40,12	38,13	30,50	28,51	0,9535	0,9062	0,7248	0,6775	1,7899	1,7011	1,3607	1,2719	36 600	869,8	1633	45,23	1,075	2,017

Таблица 39

Теплоемкость, энтальпия и энтропия этилового спирта C_2H_5OH [4]

$t°$ C	Мольная теплоемкость				Весовая теплоемкость				Объемная теплоемкость				Энтальпия			Энтропия		
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	c'_p	c'_v	c'_{pm}	c'_{vm}	μi	i	i'	μs	s	s'
	ккал/моль·град				ккал/кГ·град				ккал/нм³·град				ккал/моль	ккал/кГ	ккал/нм³	ккал/моль·град	ккал/кГ·град	ккал/нм³·град
0	16,74	14,75	16,74	14,75	0,3633	0,3202	0,3633	0,3202	0,7468	0,6582	0,7468	0,6582	0	0	0	0	0	0
100	20,11	18,12	18,46	16,47	0,4363	0,3932	0,4005	0,3574	0,8972	0,8086	0,8236	0,7350	1 846	40,05	82,36	5,68	0,123	0,253
200	23,28	21,29	20,04	18,05	0,5053	0,4622	0,4348	0,3917	1,0386	0,9500	0,8941	0,8055	4 008	86,96	178,8	10,83	0,235	0,483
300	26,10	24,11	21,61	19,62	0,5664	0,5233	0,4688	0,4257	1,1644	1,0758	0,9641	0,8755	6 483	140,6	289,2	15,56	0,338	0,694
400	28,56	26,57	23,04	21,05	0,6198	0,5767	0,5001	0,4570	1,2742	1,1856	1,0279	0,9393	9 216	200,0	411,2	19,95	0,433	0,890
500	30,70	28,71	24,36	22,37	0,6662	0,6231	0,5287	0,4856	1,3696	1,2810	1,0868	0,9982	12 180	264,4	543,4	24,06	0,522	1,073
600	32,59	30,60	25,59	23,60	0,7071	0,6640	0,5553	0,5122	1,4540	1,3654	1,1417	1,0531	15 350	333,2	685,0	27,92	0,606	1,246
700	34,23	32,24	26,70	24,71	0,7427	0,6996	0,5794	0,5363	1,5271	1,4386	1,1912	1,1026	18 690	405,6	833,8	31,54	0,685	1,408
800	35,68	33,69	27,73	25,74	0,7742	0,7311	0,6018	0,5587	1,5918	1,5032	1,2371	1,1485	22 180	481,4	989,7	34,95	0,759	1,559
900	36,95	34,96	28,68	26,79	0,8017	0,7586	0,6224	0,5793	1,6485	1,5599	1,2795	1,1909	25 810	560,2	1152	38,19	0,829	1,704
1000	38,05	36,06	29,54	27,55	0,8256	0,7825	0,6410	0,5979	1,6976	1,6090	1,3179	1,2293	29 540	641,0	1318	41,25	0,895	1,840
1100	39,00	37,01	30,36	28,37	0,8463	0,8032	0,6588	0,6157	1,7399	1,6513	1,3545	1,2659	33 400	724,7	1490	44,17	0,959	1,971
1200	39,83	37,84	31,10	29,11	0,8644	0,8213	0,6749	0,6318	1,7770	1,6884	1,3875	1,2989	37 320	809,9	1665	46,94	1,019	2,094

Таблица 40

Теплоемкость металлов и сплавов ([20], [21], [23]) в ккал/кГ·град

Название металла или сплава	Истинная c_p при $t°$ C									Средняя c_{pm} в интервале температур °C						
	−200	−100	0	20	100	200	300	500	1000	−200—0	−100—0	0—100	0—200	0—300	0—500	0—1000
Алюминий	0,075	0,175	0,210	0,214	0,224	0,235	0,241	0,26	—	0,164	0,194	0,217	0,223	0,228	0,237	—
Хром	0,034	0,076	0,102	0,105	0,113	0,119	0,125	—	—	0,071	0,090	0,108	—	0,116	—	0,135
Железо	0,032	0,085	0,105	0,108	0,116	0,127	0,139	0,162	—	0,080	0,096	0,111	0,116	0,122	0,133	0,168
Медь	0,040	0,082	0,0906	0,0915	0,0947	0,0969	0,0994	0,1049	—	0,078	0,087	0,0926	0,0949	0,0958	0,0974	—
Магний	0,13	0,21	0,239	0,243	0,255	0,268	0,276	0,30	—	0,20	0,225	0,247	—	0,260	0,27	—
Марганец	—	0,095	0,113	0,116	0,123	—	0,14	—	—	—	0,105	0,119	—	0,127	—	—
Молибден	0,020	0,050	0,059	0,060	0,062	—	—	—	0,074	0,047	0,055	0,061	—	—	—	0,067
Никель	0,036	0,087	0,1055	0,1065	0,1115	0,123	0,136	—	—	0,083	0,099	0,108	0,112	0,118	—	0,13
Платина	0,018	0,028	0,0317	0,0318	0,0324	0,0325	0,0326	0,0335	0,035	0,025	0,0306	0,0321	—	0,0328	0,0333	—
Ртуть	0,0273	0,0322	—	0,0333	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Серебро	0,0375	0,0516	0,0556	0,0559	0,0568	0,0595	0,061	0,063	0,074	0,0505	0,0539	0,0562	—	0,0572	—	—
Титан	—	—	—	0,146	—	—	—	—	—	—	—	0,1462	0,1503	0,1563	—	—
Висмут	0,024	0,0278	0,0293	0,0295	0,0303	0,032	0,034	—	—	0,027	0,0286	0,0298	0,0304	—	—	—
Цинк	0,058	0,085	0,091	0,092	0,095	0,099	0,1003	—	—	0,082	0,088	0,093	0,095	—	—	—
Чугун	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1298	0,1300	—	—	0,1600 (0—1200°)

Таблица 40а

Теплоемкость металлов и сплавов в *ккал/кГ·град* [22]

Название металла или сплава	Истинная c_p при $t°$ С				
	20	100	300	500	1000
Сталь конструкционная марки 15-КП ГОСТ 914-47	—	—	0,132	0,163	0,153
Сталь конструкционная 45 ГОСТ 1050-52	—	0,11	0,13	0,16	0,19 (при 600°)
Сталь шарикоподшипниковая	0,122 (при 45°)	—	—	0,188 (при 525°)	0,174 (при 981°)
Латунь двойная:					
Л96	0,093	—	—	—	—
Л80; Л68; Л75	0,093	—	—	—	—
Л66	0,0909	—	—	—	—
Л62	0,0925	—	—	—	—
Бронза оловянистая	0,088	—	—	—	—
Бронза алюминиевая	0,10	—	—	—	—
Монель-металл	0,127	—	—	—	—
Константан	0,0977	—	—	—	—
Нихром	0,107	—	—	—	—
Манганин	0,10	—	—	—	—

В табл. 40 и 40а даны теплоемкости металлов и сплавов для разных температур и разных температурных интервалов.

ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ

Если к твердому телу подводить тепло, то по достижении определенной температуры, называемой температурой плавления, тело начинает плавиться. Теплотой плавления данного вещества называется количество тепла в *ккал*, необходимое для превращения 1 *кГ* этого вещества при постоянной температуре в жидкое состояние. То же количество тепла выделяется, когда тело переходит из жидкого состояния в твердое.

При подведении тепла к жидкости она по достижении определенной температуры, называемой температурой кипения при данном давлении, постепенно превращается в пар. Количество тепла в *ккал*, необходимое для превращения 1 *кГ* кипящей жидкости при данном давлении и неизменной температуре в сухой насыщенный пар, называется теплотой испарения и обозначается r. Такое же количество теплоты выделяется при переходе пара в жидкость.

В табл. 41 приведены температуры плавления металлов и сплавов, в табл. 42 — температуры плавления твердых тел и жидкостей при нормальном атмосферном давлении.

Таблица 41

Температуры плавления некоторых металлов и сплавов [22]

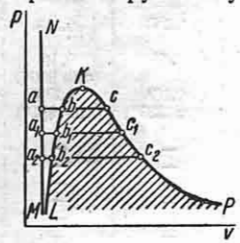
Название металла или сплава		Температура плавления в °С
Чугун:		
серый		1200
белый		1130
Сталь		1400—1500
Хромель		1500
Фехраль		1450
Манганин		910
Бронза:		
алюминиевая		~1040
оловянистая		~ 995
Латунь		~ 950
Ферронихром		1390
Монель-металл		1350
Константан		1260
Припои:		
оловянистый 0-1		232—240
оловянисто-свинцовый	ПОС-90	183—222
	ПОС-40	183—235
	ПОС-30	183—245
	ПОС-18	183—277
свинцовый С-1, С-2		327
медноцинковый	ПМЦ-36	800—825
	ПМЦ-48	825—850
	ПМЦ-54	850—875
серебряный	ПСР-70	750
	ПСР-45	720

КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

В 1860 г. Д. И. Менделеев впервые установил, что все вещества имеют определенную критическую температуру, «при которой частицы жидкости вполне теряют свое сцепление (поднятие в

капилляре равно нулю, скрытое тепло испарения равно нулю) и при которой жидкость, несмотря ни на какое давление и объем, вся превращается в пар».

В дальнейшем учение о критическом состоянии вещества получило развитие в работах русских ученых А. Г. Столетова, М. П. Авенариуса и др.



Фиг. 12. Диаграмма $p - v$.

Процессы подогрева жидкости до температуры кипения (ab, a_1b_1, ...) и процессы парообразования (bc, b_1c_1, ...) при различных давлениях могут быть представлены в p—v-диаграмме (фиг. 12), на которой линия MN выражает зависимость удельного объема жидкости при 0° С от давления. Эта линия почти параллельна оси ординат. Линия LK, или нижняя пограничная кривая, выражает зависимость удельного объема жидкости при температуре кипения от давления. Линия KP, или верхняя пограничная кривая, выражает зависимость удельного объема сухого насыщенного пара от давления. Заштрихованная область, заключенная между нижней и верхней пограничными кривыми, соответствует двухфазной системе различных степеней сухости; левее нижней пограничной кривой располагается область жидкости, правее и выше верхней пограничной кривой — область перегретого пара. При увеличении давления пограничные кривые постепенно сближаются и при некотором вполне определенном для каждого вещества давлении сходятся в точке K, называемой *критической точкой*.

Точка K соответствует предельному, критическому состоянию вещества, при котором исчезает видимый мениск между жидкостью и паром, и переход из одного фазового состояния в другое происходит без поглощения или выделения тепла.

Параметры вещества при этом состоянии называются *критическими* и обозначаются p_k, v_k, t_k. Для каждого вещества критические параметры имеют определенные значения. Основные физические величины для наиболее распространенных газов, в том числе критические параметры, а также постоянные a и b в уравнении состояния реального газа ван-дер-Ваальса $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$ приведены в табл. 43.

Процессы перехода вещества из твердого состояния в жидкое и из твердого состояния в газообразное, т. е. процессы плавления и сублимации (или возгонки), удобнее рассматривать в диаграмме p—t (фиг. 13), на которой линия AB отделяет область твердого вещества от области газа, линия AC — область твердого вещества от области жидкости, линия AK — область жидкости от области газа. В отдельных точках линии AB вещество может существовать одновременно в двух фазах — твердой и газообразной, линии AC — в твердой и жидкой, линии AK — в жидкой и газообразной.

Фиг. 13. Диаграмма $p - t$.

В тройной точке A, принадлежащей одновременно линиям AB, AC и AK, вещество может существовать в трех фазах — твердой, жидкой и газообразной. Каждое вещество имеет определенные параметры, соответствующие тройной точке;

для воды $p_A = 4{,}58$ *мм* рт. ст. и $t_A = 0{,}0075°$ С;

для углекислоты $p_A = 5{,}1$ *ата* и $t_A = -56{,}7°$ С.

Таблица 42

Температура плавления твердых тел и жидкостей при нормальном атмосферном давлении [12]

Название элемента	Температура плавления в °С
Азотная кислота 90%-ная	−41
Битум № 3	120
Бензол	5,48
Вода	0
Воск пчелиный	61—64
Глицерин	19
Гуттаперча	130
Канифоль	105—115
Кварц	1600
Каучук	125
Кремний	1414
Нафталин	80
Парафин	54
Сера	114,6
Сернистая кислота дымящаяся	10
Соль поваренная	770
Стекло оконное	1100—1300
Углерод	3500
Фосфор	44
Шеллак	100—115
Шлаки доменные	1300—1430

Таблица 43

Критические параметры и тепловые характеристики газов [19]

Газ	Химическая формула	Атомный или молекулярный вес	Газовая постоянная $R_{\frac{кГм}{кг \cdot град}}$	Температура в °С		Теплота в *ккал/кГ*		Критические параметры			Постоянные	
				кипения при 760 *мм* рт. ст.	плавления	испарения при температуре кипения, соответствующей 760 *мм* рт. ст.	плавления	$t_к$ в °С	$p_к$ в *ата*	$\gamma_к$ в $кГ/м^3$	a в *ата* · $см^6$ $\times 10^{-6}$	b в $см^3$
Азот	N_2	28,02	30,26	−195,78	−210,01	47,58	6,1	−147,13	33,49	310,96	1,347	38,6
Аммиак	NH_3	17,03	49,79	− 33,4	− 77,7	328	83,7	+132,4	111,5	236	4,19	37,3
Аргон	Ar	39,94	21,26	−185,87	−189,3	38,9	6,7	−122,44	48,00	~531	1,35	32,3
Ацетилен	C_2H_2	26,02	32,59	− 83,6	− 81,8	198	—	+ 35,7	61,6	231	4,37	51,2
Воздух	—	(28,95)	29,27	−192—195	—	47	—	−140,75—140,65	37,25—37,17	310—350	1,33	36,6
Водород	H_2	2,016	420,6	−252,754	−259,2	108,5	14	−239,9	12,8	31	0,245	26,6
Гелий	He	4,002	212,00	−268,95	−271,4 (30 *ат*)	4,66	1,365	−267,96	2,26	69,3	0,032	23,4
Двуокись азота	NO_2	46,01	18,40	+21,2	− 10,8	170,0	33,3	+158,2	100,0	570	5,28	44,3
Кислород	O_2	32	26,5	−182,98	−218,83	50,92	3,3	−118,82	49,713	429,9	1,36	31,9
Криптон	Kr	83,7	10,23	−153,21	−157,17	28,5	1,91	− 63,75	54,182	780	2,31	39,8
Ксенон	Xe	131,30	6,51	−109,1	−140	23,7	5,64	+ 16,6	58,20	1154	4,1	51,4
Метан	CH_4	16,03	52,90	−161,58	−182,6	122	14,5	− 82,15	45,6	162	2,25	42,8
Неон	Ne	20,183	41,98	−246,08	−248,6	20,5	3,4	−228,7	26,86	483,5	2,12	62,0
Окись азота	NO	30,01	28,26	−151,0	−163,7	106,6	18,4	− 94	65	520	1,34	28,0
„ углерода	CO	28,00	30,29	−191,48	−209,44	50,5	8,0	−140,2	34,53	311	3,60	42,8
Пропан	C_3H_8	44,06	19,25	− 42,1	−187,71	102	19,2	+ 95,6	43	232	8,75	85,4
Сероводород	H_2S	34,09	24,90	− 60,2	−83	131	18,5	+100,4	188,9	—	4,40	42,6
Двуокись серы	SO_2	64,06	13,24	− 10,8	− 72,1	94	32,2	+157,5	77,78	520	6,80	57,2
Углекислота	CO_2	44,00	19,27	−78,2 (возг.)	− 56,6	137	45,3	+ 31,1	72,9	460	1,46	39,4
Хлор	Cl_2	70,91	11,96	− 33,8	−101,0	72,95	30,1	+144,0	76,1	573	6,50	56,2
Этан	C_2H_6	30,06	28,21	− 88,50	−183,65	116	29,2	+ 32,1	48,85	210	5,39	63,9
Этилен	C_2H_4	28,03	30,25	−103,7	−169,15	115	28,5	+ 9,7	50,7	220	4,48	57,2

ГЛАВА II

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A = \frac{1}{427}$ [*ккал/кГм*] — тепловой эквивалент работы.

μc, μc_v, μc_p [*ккал/моль. град*] — мольные теплоемкости.

c, c_v, c_p [*ккал/кГ·град*] — весовые теплоемкости.

d — весовое влагосодержание влажного воздуха в 1 *Г* или 1 *кГ* сухого воздуха.

$\varepsilon = \frac{q_0}{Al}$ — холодильный коэффициент.

$\eta_t = \frac{Al}{q_1}$ — термический к. п. д.

f [*м*^{2}] — площадь поперечного сечения.

φ — относительная влажность воздуха.

G [*кГ*] — весовое количество вещества.

$g = 9{,}81$ [*м/сек*^{2}] — ускорение силы тяжести.

γ [*кГ/м*^{3}] — удельный вес.

I [*ккал*], i [*ккал/кГ*] — энтальпия.

$k = \frac{c_p}{c_v}$ — показатель адиабаты.

L [*кГм*], l [*кГм/кг*] — механическая работа.

M — число молей.

μ [*кГ*] — вес моля.

μ [безразмерная величина] — молекулярный вес.

n — показатель политропы.

нм$^3 = \frac{1}{22{,}4}$ моля — нормальный кубический метр.

p [*кГ/см*^{2}] — давление.

ψ — степень насыщения воздуха.

Q [*ккал*], q [*ккал/кг*] — количество тепла.

R [*кГм/кг·град*] — газовая постоянная.

S [*ккал/град*], s [*ккал/кг·град*] — энтропия.

$T°$ абс. или °К — абсолютная температура.

$t°$ С — температура в градусах стоградусной шкалы.

U [*ккал*], u [*ккал/кг*] — внутренняя энергия.

V [*м*^{3}] — объем.

v [*м*^{3}/*кГ*] — удельный объем.

w [*м/сек*] — скорость.

x [*кг/кг*] — паросодержание.

y [*кг/кг*] — влагосодержание.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики — частный случай закона сохранения и превращения энергии. Глубокий смысл его заключается в утверждении не только сохранения, но и взаимопревращаемости всех видов энергии. Эта мысль была высказана еще в 1748 г. гениальным русским ученым М. В. Ломоносовым.

Энгельс формулировал философское содержание первого закона так: „Любая форма движения способна и вынуждена при определенных для каждого случая условиях превращаться, прямо или косвенно, в любую другую форму движения" *.

Тепло может превращаться в работу, а работа — в тепло по определенным, раз и навсегда установленным эквивалентам. Одна большая калория, превращаясь в работу, дает 427 *кГм*. Величина $\frac{1}{A} = 427$ *кГм/ккал* называется механическим эквивалентом тепла; обратная величина $A = \frac{1}{427}$ *ккал/кГм* называется тепловым эквивалентом работы.

Иногда первый закон термодинамики формулируется как невозможность осуществления вечного двигателя первого рода, т. е. периодически действующей машины, которая производила бы внешнюю работу, не получая ниоткуда энергии.

---

* Фридрих Энгельс, Диалектика природы, Госполитиздат, 1953, стр. 178.

Аналитически первый закон термодинамики выражается уравнением $dq = du + Adl$ для бесконечно-малого изменения состояния или $q = \Delta u + Al$ для конечного процесса, где q — количество тепла в *ккал/кг*, подведенное к телу в процессе изменения его состояния; l — внешняя работа в *кГм/кг*, совершенная телом; $\Delta u = u_2 - u_1$ — изменение внутренней энергии тела в *ккал/кг*; A — тепловой эквивалент работы.

Внутренняя энергия u — однозначная функция термодинамического состояния тела; изменение внутренней энергии не зависит от характера или пути процесса; du — полный дифференциал.

Для подсчета энергии тела принимают условную нулевую точку как начало отсчета; поэтому подсчитывают лишь связанные с переходом из одного состояния в другое изменения этой энергии, т. е. разность энергий в конечном и в начальном состояниях. В частном случае воды и водяных паров за нулевое состояние энергии принимается состояние воды при 0° стоградусной шкалы температур.

Аналитическое и графическое выражение работы. В дальнейшем рассматриваются исключительно жидкости, газы и пары; внешняя работа l, совершаемая ими, состоит в преодолении внешнего давления на их поверхность, которое при обратимом изменении состояния всегда равняется внутреннему давлению рабочего тела. В таких случаях $dl = pdv$ и $l = \int_{v_1}^{v_2} pdv$, где p — давление, а v — удельный объем жидкости или газа.

Работа положительна, если она совершается системой, и отрицательна, если она воспринимается системой.

Графически в координатах $p - v$ работа изображается площадью, ограниченной кривой процесса, осью абсцисс и крайними ординатами. Изображение процесса в координатах $p - v$ называют рабочей диаграммой. Работа зависит от пути протекания процесса и есть функция процесса, а не состояния; dl — неполный дифференциал.

Внешнее тепло согласно аналитическому выражению первого закона — алгебраическая сумма работы и внутренней энергии; следовательно, оно зависит от пути перехода тела из одного состояния в другое; dq — неполный дифференциал.

Тепло положительно, если оно подводится к системе, и отрицательно, если оно от системы отводится.

Процессы обратимые и необратимые. Равновесным состоянием называется состояние тела, при котором параметры его одинаковы во всех точках тела.

Равновесный процесс — это процесс, состоящий из непрерывного ряда следующих друг за другом равновесных состояний. Так как равновесный процесс осуществить нельзя, то обычно рассматриваются процессы квазистатические, протекающие бесконечно-медленно, причем всякое состояние тела бесконечно-мало отличается от равновесного.

Обратимым процессом называется такой квазистатический процесс, который может быть проведен в обратном направлении через все промежуточные состояния прямого процесса и который имеет единственным своим результатом возвращение системы в первоначальное состояние.

Необратимый процесс протекает только в одном направлении, без возможности самопроизвольного возвращения всей системы в целом в свое исходное состояние.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Нельзя построить периодически действующую машину, работающую от одного источника тепла с одной температурой; необходимы два источника тепла с двумя различными температурами.

Первый закон термодинамики, устанавливая количественную эквивалентность тепла и работы, ничего не говорит о направленности процессов их протекания. Эти условия устанавливает второй закон термодинамики.

Впервые существо этого закона было высказано М. В. Ломоносовым в 1747 г. в его труде „Размышление о природе теплоты и холода“: „Холодное тело B, погруженное в (теплое) тело A, не может воспринять большую степень теплоты, чем какую имеет A“.

Клаузиус в середине XIX столетия формулировал второй закон термодинамики следующим образом: „Теплота не может переходить от холодного к теплому телу сама собой, даровым процессом“.

По Карно наибольший к. п. д. тепловой машины не зависит от рода рабо-

чего тела и определяется только предельными температурами, между которыми машина работает:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — абсолютная температура источника тепла; T_2 — абсолютная температура холодильника.

Иногда второй закон формулируется как невозможность осуществления вечного двигателя второго рода, т. е. периодически действующей машины, которая все тепло одного источника полностью превращала бы в работу.

Рассмотрение произвольного кругового обратимого процесса приводит к следующему аналитическому выражению второго закона термодинамики:

$$\int \frac{dq}{T} = 0.$$

Это дает возможность ввести новую функцию состояния тела — *энтропию* s. Она определяется по своему дифференциалу $ds = \frac{dq}{T}$, откуда получается $dq = T \cdot ds$, что справедливо для любого обратимого процесса.

Коренное различие между обратимыми и необратимыми процессами состоит в том, что при совершении обратимого процесса сумма энтропий всех тел, участвующих в процессе, остается постоянной, т. е. $ds = 0$. При совершении же необратимого процесса эта сумма энтропий увеличивается, т. е. $ds > 0$.

Основываясь на втором законе термодинамики, можно вычислять лишь разности энтропий в двух состояниях или относить величину энтропии к некоторому состоянию, произвольно выбранному за нулевое. В частном случае воды и водяных паров за нулевое состояние энтропии принимается состояние воды при 0° стоградусной шкалы.

ПОТЕРИ РАБОТЫ ВСЛЕДСТВИЕ НЕОБРАТИМОСТИ

Второй закон термодинамики дает возможность численно определить потерю работы за счет необратимости процесса.

Опыт показывает, что любой действительный процесс является необратимым. Необратимость же процесса влечет за собой потерю работы и тем самым понижение экономичности двигателя или какого-либо другого теплового агрегата.

Потеря работы вследствие необратимости ΔAL может быть определена по уравнению

$$\Delta AL = T_0 \cdot \Delta S,$$

где T_0 представляет собой абсолютную температуру холодильника (т. е. практически температуру среды), а ΔS — изменение энтропии системы, обусловленное необратимостью процесса.

Задача заключается в определении способа уменьшения степени необратимости процесса и увеличения экономичности двигателя или агрегата.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Термодинамической или характеристической функцией называется функция состояния термодинамической системы, позволяющая при соответствующем выборе независимых переменных выражать через свои производные наиболее просто и в явном виде термодинамические свойства системы.

Два основных закона термодинамики дают общее соотношение

$$T ds = du + A p\, dv,$$

связывающее пять переменных величин: p, v, T, u, s.

Все перечисленные величины зависят не от характера процесса, а лишь от состояния тела. Любые две из этих величин могут быть приняты за независимые переменные, и уравнение

$$T ds = du + A p\, dv$$

будет иметь лишь три неизвестные величины. Для их определения необходимы три уравнения: 1) $T ds = du + A p\, dv$; 2) уравнение состояния $f(p, v, T) = 0$; 3) выражение характеристической функции, удобной для данного случая.

Внутренняя энергия u. Так как $du = T\, ds - A p\, dv$, то $u = u(s, v)$, т. е. внутренняя энергия представляет собой характеристическую функцию при независимых переменных s и v:

$$T = \left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v; \quad dT = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial s^2}\right) ds + \frac{\partial^2 u}{\partial s\, \partial v}\, dv;$$

$$p = -\frac{1}{A}\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_s;$$

$$dp = -\frac{1}{A}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial v\, \partial s}\, ds + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial v^2}\right)_s dv\right].$$

Энтальпия *i. Энтальпией* называется функция состояния, выраженная уравнением $i = u + Apv$ или $di = Tds + Av\,dp$, откуда $i = i(s, p)$; таким образом энтальпия — характеристическая функция при независимых переменных s и p:

$$T = \left(\frac{\partial i}{\partial s}\right)_p;$$

$$dT = \frac{\partial^2 i}{\partial s\,\partial p}\,dp + \left(\frac{\partial^2 i}{\partial s^2}\right)_p ds;$$

$$v = \frac{1}{A}\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_s;$$

$$dv = \frac{1}{A}\left[\left(\frac{\partial^2 i}{\partial p^2}\right)_s dp + \frac{\partial^2 i}{\partial p\,\partial s}\,ds\right];$$

$$i = u + p\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_s.$$

Свободная энергия F. Свободной энергией называется функция состояния, выраженная уравнением $F = u - Ts$ или $dF = -Ap\,dv - s\,dT$, откуда $F = F(v, T)$; следовательно, свободная энергия — характеристическая функция при независимых переменных v и T. В случае обратимого изотермического процесса свободная энергия равна работе расширения, химических реакций, поверхностного натяжения и других сил

$$s = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_v;$$

$$ds = -\left(\frac{\partial^2 F}{\partial T^2}\right)_v dT - \frac{\partial^2 F}{\partial T\,\partial v}\,dv;$$

$$p = -\frac{1}{A}\left(\frac{dF}{dv}\right)_T;$$

$$dp = -\frac{1}{A}\left[\left(\frac{\partial^2 F}{\partial v^2}\right)_T dv + \frac{\partial^2 F}{\partial v\,\partial T}\,dT\right];$$

$$F = u + T\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_v.$$

Термодинамический потенциал Φ. *Термодинамическим потенциалом* называется функция состояния, выраженная уравнением $\Phi = u - Ts + Apv = F + Apv = i - Ts$ или $d\Phi = Av\,dp - s\,dT$, откуда $\Phi = \Phi(p, T)$; следовательно, термодинамический потенциал — характеристическая функция при независимых переменных p и T.

В случае обратимого процесса, протекающего при $p = \text{const}$ и $T = \text{const}$, термодинамический потенциал равен всей работе за вычетом работы расширения:

$$s = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_p;$$

$$ds = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial T\,\partial p}\,dp - \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial T^2}\right)_p dT;$$

$$v = \frac{1}{A}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial p}\right)_T;$$

$$dv = \frac{1}{A}\left[\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial p^2}\right)_T dp + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial p\,\partial T}\,dT\right];$$

$$\Phi = i + T\left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_p.$$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

Дифференциальные уравнения термодинамики устанавливают общую аналитическую зависимость между термодинамическими функциями и величинами.

Независимые переменные T и v:

$$dq = c_v dT + AT\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv \quad (ккал/кг);$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + A\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv \quad (ккал/кг \cdot град)$$

$$du = c_v dT + \left[AT\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - Ap\right] dv \quad (ккал/кг).$$

Для идеального газа, подчиняющегося уравнению $pv = RT$:

$$dq = c_v dT + Apdv;$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + AR\frac{dv}{v};$$

$$du = c_v dT.$$

Независимые переменные T и p:

$$dq = c_p dT - AT\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp \quad (ккал/кг);$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - A\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp \quad (ккал/кг \cdot град);$$

$$di = c_p dT + \left[Av - AT\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right] dp \quad (ккал/кг).$$

Для идеального газа:

$$dq = c_p dT - Avdp;$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - AR \frac{dp}{p};$$

$$di = c_p dT.$$

Независимые переменные p и v:

$$dq = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p dv + c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v dp \ (ккал/кг);$$

$$ds = \frac{c_p}{T}\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p dv +$$

$$+ \frac{c_v}{T}\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v dp \ (ккал/кг \cdot град);$$

$$du = \left[c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p - Ap\right] dv +$$

$$+ c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v dp \ (ккал/кг);$$

$$di = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p dv +$$

$$+ \left[c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v + Av\right] dp \ (ккал/кг).$$

Для идеального газа:

$$dq = \frac{c_p}{R} pdv + \frac{c_v}{R} vdp;$$

$$ds = c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p}.$$

Теплоемкости:

$$c_p - c_v =$$

$$= AT \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p (ккал/кг \cdot град);$$

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = - AT \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p;$$

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = AT \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v.$$

Для идеального газа

$$c_p - c_v = AR;$$

$$\mu c_p - \mu c_v = A\mu R =$$

$$= \frac{1}{427} \cdot 848 = 1{,}985 \approx 2 \ ккал/моль \cdot град;$$

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = 0; \quad \left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = 0.$$

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

С молекулярно-кинетической точки зрения идеальный газ — система материальных точек, находящихся в беспорядочном движении и не обладающих силами притяжения.

Объем, занимаемый самими молекулами, исчезающе мал по сравнению с объемом молекулярного пространства, т. е. молекулы принимаются за материальные точки, распределенные равномерно в объеме газа; газ этот подчиняется уравнению $pv = RT$, а для произвольного количества G кг газа этот же закон выражается формулой $pV = GRT$.

Основное уравнение кинетической теории газов. Основное уравнение кинетической теории

$$p = \frac{2}{3} n \frac{mw^2}{2},$$

где p — давление газа; n — число молекул в 1 $м^3$ газа; m — масса молекулы, одинаковая в однородном газе для всех молекул; w — средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул.

Уравнение Бойля-Мариотта:
при $T = \text{const}$

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{const}$$

или

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}; \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}.$$

Уравнение Гей-Люссака:
при $p = \text{const}$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2};$$

$$v_t = v_0 (1 + \alpha t);$$

при $v = \text{const}$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2};$$

$$p_t = p_0 (1 + \beta t),$$

где v_t и p_t — удельный объем и давление при температуре t; v_0 и p_0 — удельный объем и давление при 0° С.

Для идеального газа $\alpha = \beta = 0{,}0036604 = \frac{1}{273{,}16}$.

Уравнение Клапейрона:

$$pv = RT \text{ для 1 } кг;$$

$$pV = GRT \text{ для } G \text{ } кг.$$

Уравнение Менделеева

$$p\mu v = \mu RT \text{ для 1 моля газа,}$$

где μ — молекулярный вес газа; R — газовая постоянная в $кГм/кг \cdot град$; $\mu R = 848$ $кГм/моль \cdot град$ — универсальная газовая постоянная.

Для любого газа $R = \frac{848}{\mu}$.

Закон Авогадро. В равных объемах разных газов, находящихся при одинаковых температуре и давлении, заключается одинаковое число молекул. Число молекул в граммолекуле, или число Авогадро, $N = 6{,}064 \cdot 10^{23}$.

Из сказанного следует:

1. Отношение весов равных объемов разных газов, находящихся при одинаковых температуре и давлении, равно отношению молекулярных весов этих газов:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}.$$

2. Объемы молей разных газов, взятых при одинаковых температуре и давлении, равны между собой.

При нормальных условиях ($p = 760$ *мм* рт. ст. и $t = 0°$ С)

$$\mu v = 22{,}416 \approx 22{,}4 \text{ } нм^3/моль.$$

При технических условиях ($p = 1$ $кГ/см^2$ и $t = 15°$ С)

$$\mu v = 24{,}4 \text{ } м^3/моль.$$

СМЕСИ ГАЗОВ

Каждый близкий по своим свойствам к идеальному газ, входящий в смесь, ведет себя так, как если бы в смеси не было других газов, распространяется по всему объему смеси и следует своему уравнению состояния, которое позволяет определить его параметры. Давление газа в смеси называется парциальным.

Приведенным объемом газа называется объем, занимаемый газом при давлении и температуре смеси.

Закон Дальтона. Общее давление смеси равно сумме давлений отдельных газов, образующих смесь, т. е. сумме парциальных давлений

$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_n.$$

В дальнейшем рассматриваются смеси идеальных газов, подчиняющихся уравнению $pV = GRT$ и образующих механическую смесь. Каждый газ, входящий в смесь, занимает весь объем смеси V и имеет температуру смеси T.

Способы задания газовой смеси

1. Весовыми частями или долями:

$$\frac{G_1}{G} = g_1; \quad \frac{G_2}{G} = g_2; \ldots; \quad \frac{G_n}{G} = g_n,$$

где G_1, G_2, ..., G_n — веса отдельных газов, образующих смесь; G — общий вес смеси; g_1, g_2, ..., g_n — весовые доли отдельных газов;

$$G_1 + G_2 + \ldots + G_n = G;$$

$$g_1 + g_2 + \ldots + g_n = 1.$$

2. Объемными частями:

$$\frac{V_1}{V} = r_1; \quad \frac{V_2}{V} = r_2; \ldots; \quad \frac{V_n}{V} = r_n,$$

где $V_1, V_2, \ldots, V_n$ — приведенные объемы отдельных газов; V — общий объем смеси; r_1, r_2, ..., r_n — объемные доли отдельных газов:

$$V_1 + V_2 + \ldots + V_n = V;$$

$$r_1 + r_2 + \ldots + r_n = 1.$$

3. Задание смеси числом молей тождественно заданию объемными долями:

$$\frac{M_1}{M} = \frac{V_1}{V} = r_1;$$

$$\frac{M_2}{M} = \frac{V_2}{V} = r_2; \ldots;$$

$$\frac{M_n}{M} = \frac{V_n}{V} = r_n,$$

где $M_1, M_2, \ldots, M_n$ — число молей отдельных газов; M — общее число молей смеси.

Основные соотношения и зависимости для газовых смесей приведены в табл. 1

Давление и температура газов после смешения. Смешение при $V = \text{const}$. Химически не действующие

Таблица 1

Соотношения для газовых смесей при разных способах их задания [3]

Способ задания смеси	Удельный вес и удельный объем смеси	Средний или кажущийся молекулярный вес смеси	Выражение весовых долей через объемные и объемных через весовые	Газовая постоянная смеси газов	Парциальное давление	Теплоемкость смеси газов
Весовыми долями $g_1, g_2, \ldots, g_n$	$v_{см} = \sum_1^n \frac{g_i}{\gamma_i}$ $\gamma_{см} = \frac{1}{v_{см}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\gamma_i}}$	$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R_{см} = \sum_1^n g_i R_i =$ $= 848 \left[\frac{g_1}{\mu_1} + \frac{g_2}{\mu_2} + \ldots + \frac{g_n}{\mu_n}\right]$	$p_i = g_i \frac{R_i}{R_{см}} p$	$c_{см} = \sum_1^n g_i c_i$
Объемными долями $r_1, r_2, \ldots, r_n$	$\gamma_{см} = \sum_1^n r_i \gamma_i$ $v_{см} = \frac{1}{\gamma_{см}} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \gamma_i}$	$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$R_{см} = \frac{848}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_i = r_i p$	$c_{см} = \frac{\sum_1^n r_i \mu_i c_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$

друг на друга газы до смешения имеют объемы $V_1, V_2, \ldots, V_n$, веса $G_1, G_2, \ldots, G_n$ при давлениях $p_1, p_2, \ldots, p_n$ и температурах $t_1, t_2, \ldots, t_n$.

Объем смеси

$$V = \sum_1^n V_i.$$

Температура смеси

$$T = \frac{\sum_1^n p_i V_i \left(\mu_i c_{v_i}\right)_0^{T_i}}{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i} \left(\mu_i c_{v_i}\right)_0^{T}}$$

или

$$t = \frac{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i} \left(\mu_i c_{v_i}\right)_0^{t_i} t_i}{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i} \left(\mu_i c_{v_i}\right)_0^{t}}.$$

Давление после смешения

$$p = \frac{T}{V} \sum_1^n G_i R_i = \frac{T}{V} \sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}.$$

Все эти уравнения основаны на равенстве внутренней энергии системы до и после смешения, вытекающем по первому закону термодинамики из условия отсутствия теплообмена с окружающей средой и неизменности объема до и после смешения, т. е. из отсутствия внешней работы.

Смешение потоков газа. Потоки газов имеют расходы в единицу времени по весу $G_1, G_2, \ldots, G_n$, по объему $V_1, V_2, \ldots, V_n$; их давления и температуры $p_1, p_2, \ldots, p_n$; $t_1, t_2, \ldots, t_n$; давление p после смешения не должно превышать давления того потока, у которого оно было наименьшим.

Отсутствие при смешении теплообмена с окружающей средой и отдачи внешней работы приводит поставленную задачу к условию, что энтальпия системы остается неизменной.

Температура после смешения

$$T = \frac{\sum_1^n p_i V_i \,(\mu_i c_{p_i})_0^{T_i}}{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}\,(\mu_i c_{p_i})_0^{T}}$$

или

$$t = \frac{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}\,(\mu_i c_{p_i})_0^{t_i}\, t_i}{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}\,(\mu_i c_{p_i})_0^{t}}.$$

Объемный расход смеси в единицу времени при температуре T и давлении p

$$V = \frac{T}{p}\sum_1^n \frac{p_i V_i}{T_i}.$$

Если мольные теплоемкости и давление газов во всех потоках одинаковы, то

$$T = \frac{\sum_1^n V_i}{\sum_1^n \frac{V_i}{T_i}} \quad \text{и} \quad V = \sum_1^n V_i.$$

ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Так как формулы основных газовых процессов отнесены к 1 $\kappa\Gamma$ газа, то при весе G $\kappa\Gamma$ следует принимать соответственно:

$$V = G\cdot v; \quad L = G\cdot l; \quad Q = G\cdot q;$$

$$U = G\cdot u; \quad S = G\cdot s; \quad I = G\cdot i.$$

Изохорический процесс — это процесс, протекающий при постоянном объеме (фиг. 1 и 2); $v = \text{const}$; $dv = 0$;

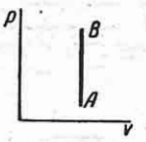
$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad dl = pdv = 0;$$

$$c = c_v; \quad dq = du = c_v dt;$$

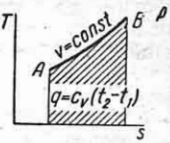
$$q = u_2 - u_1 = c_v\,(t_2 - t_1).$$

Все тепло, сообщаемое газу, идет на увеличение внутренней энергии газа

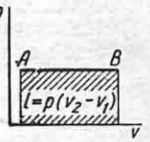
$$(s_2 - s_1)_v = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}.$$



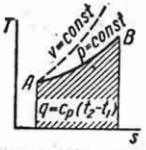
Фиг. 1. Изохорический процесс.



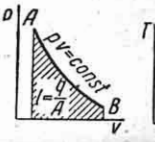
Фиг. 2.



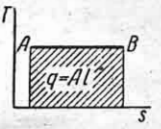
Фиг. 3. Изобарический процесс.



Фиг. 4.



Фиг. 5. Изотермический процесс.



Фиг. 6.

Изобарический процесс — это процесс, протекающий при постоянном давлении (фиг. 3 и 4); $p = \text{const}$; $dp = 0$;

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad l = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p\,(v_2 - v_1) =$$

$$= R\,(T_2 - T_1) = R\,(t_2 - t_1);$$

$$c = c_p; \quad dq = c_p dt = di;$$

$$q = c_p\,(t_2 - t_1) = i_2 - i_1;$$

$$(s_2 - s_1)_p = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Изотермический процесс—это процесс, протекающий при постоянной температуре (фиг. 5 и 6); $t = \text{const}$; $dt = 0$;

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = pv = \text{const}; \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2};$$

$$du = c_v dt = 0; \quad u = \text{const};$$

$$di = c_p dt = 0; \quad i = \text{const};$$

$$dq = Adl = Apdv;$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} pdv = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} =$$

$$= p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 2{,}303 p_1 v_1 \lg \frac{p_1}{p_2};$$

$$q = Al = ART \ln \frac{v_2}{v_1} = Ap_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} =$$

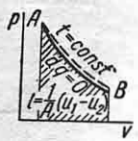
$$= 2{,}303 p_1 v_1 \lg \frac{p_1}{p_2};$$

$$c = \infty.$$

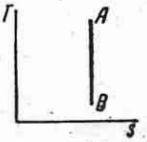
Адиабатический процесс характеризуется отсутствием теплообмена с окружающей средой (фиг. 7 и 8):

$$dq = 0.$$

На фиг. 7 показано также взаимное расположение адиабаты и изотермы в pv-диаграмме.



Фиг. 7. Адиабатический процесс.



Фиг. 8.

Соотношение параметров:

$$p \cdot v^k = \text{const}; \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k;$$

$$T \cdot v^{k-1} = \text{const}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1};$$

$$T \cdot p^{\frac{1-k}{k}} = \text{const}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Определение работы:

$$Al = u_1 - u_2 = c_v (t_1 - t_2);$$

$$l = \frac{c_v}{A}(t_1 - t_2) = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2);$$

$$l = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2);$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right);$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right];$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right].$$

Теплоемкость $c = 0$.

Уравнение адиабаты при переменной теплоемкости ($c_v = a_v + bT$; $c_p = a_p + bT$):

$$pv^{\frac{a_p}{a_v}} \cdot e^{\frac{b}{a_v} \cdot T} = \text{const}.$$

Политропический процесс — это процесс, удовлетворяющий уравнению $pv^n = \text{const}$, где n — произвольное, но для данного процесса постоянное число.

Для идеального газа с постоянной теплоемкостью c_p и c_v каждый политропический процесс имеет определенное отношение $\frac{\Delta u}{q} = \alpha$, и уравнение $pv^n = \text{const}$ обобщает рассмотренные ранее процессы:

$v = \text{const}$; $n = \pm\infty$; $\alpha = 1$; $c = c_v$;

$p = \text{const}$; $n = 0$; $\alpha = \frac{1}{k}$; $c = c_p$;

$t = \text{const}$; $n = 1$; $\alpha = 0$; $c = \infty$;

$dq = 0$; $n = k$; $\alpha = \infty$; $c = 0$.

При $c_v \neq \text{const}$ расчет может быть проведен графо-аналитически, делением кривой процесса на участки с постоянными значениями c_v и последующим определением n, α и c.

Политропические процессы обычно применяются для изображения действительных процессов расширения в тепловых двигателях; при этом показатель политропы изменяется от 1 до k.

Соотношение параметров:

$$p \cdot v^n = \text{const}; \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n;$$

$$T \cdot v^{n-1} = \text{const}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1};$$

$$T \cdot p^{\frac{1-n}{n}} = \text{const}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Определение работы:

$$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2);$$

$$l = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2);$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right);$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right];$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right].$$

При расчетах адиабатического и политропического процессов можно пользоваться табл. 2.

Таблица 2

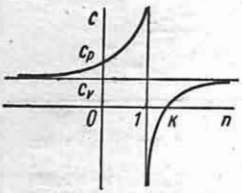
Адиабатическое и политропическое расширение газов [3]

$\frac{p_1}{p_2}$	n				n			
	1,4 (адиабата)	1,3	1,2	1,1	1,4 (адиабата)	1,3	1,2	1,1
	Значения $\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{v_2}{v_1}$				Значения $\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_1}{T_2}$			
1,1	1,070	1,076	1,083	1,090	1,028	1,022	1,016	1,009
1,2	1,139	1,151	1,164	1,180	1,053	1,043	1,031	1,017
1,3	1,206	1,224	1,224	1,269	1,078	1,062	1,045	1,024
1,4	1,271	1,295	1,323	1,358	1,101	1,081	1,058	1,031
1,5	1,336	1,366	1,401	1,445	1,123	1,098	1,070	1,038
1,6	1,399	1,436	1,479	1,533	1,144	1,115	1,081	1,044
1,7	1,461	1,504	1,557	1,620	1,164	1,130	1,092	1,050
1,8	1,522	1,571	1,633	1,706	1,183	1,145	1,103	1,055
1,9	1,581	1,638	1,706	1,791	1,201	1,160	1,113	1,060
2,0	1,641	1,705	1,782	1,879	1,219	1,174	1,123	1,065
2,5	1,924	2,023	2,145	2,300	1,299	1,235	1,165	1,087
3,0	2,193	2,330	2,498	2,715	1,369	1,289	1,201	1,105
3,5	2,449	2,624	2,842	3,126	1,431	1,336	1,232	1,121
4,0	2,692	2,907	3,177	3,505	1,487	1,378	1,260	1,134
4,5	2,926	3,178	3,500	3,925	1,537	1,415	1,285	1,147
5,0	3,156	3,449	3,824	4,320	1,583	1,449	1,307	1,157
5,5	3,378	3,712	4,142	4,710	1,627	1,482	1,328	1,167
6,0	3,598	3,970	4,447	5,100	1,668	1,512	1,348	1,177
6,5	3,809	4,218	4,760	5,483	1,707	1,540	1,366	1,186
7,0	4,012	4,467	5,058	5,861	1,742	1,566	1,383	1,194
7,5	4,217	4,710	5,360	6,250	1,778	1,591	1,399	1,201
8,0	4,415	4,950	5,650	6,620	1,811	1,616	1,414	1,208
8,5	4,612	5,187	5,950	6,997	1,843	1,639	1,429	1,215
9,0	4,800	5,420	6,240	7,370	1,873	1,660	1,442	1,221
9,5	4,993	5,651	6,528	7,742	1,903	1,681	1,455	1,227
10,0	5,188	5,885	6,820	8,120	1,931	1,701	1,468	1,233
11	5,544	6,325	7,376	8,845	1,984	1,739	1,491	1,244
12	5,900	6,763	7,931	9,574	2,034	1,774	1,513	1,253
13	6,247	7,193	8,478	10,30	2,081	1,807	1,533	1,263
14	6,587	7,614	9,018	11,01	2,126	1,839	1,549	1,271
15	6,919	8,030	9,551	11,73	2,168	1,868	1,570	1,279
16	7,246	8,438	10,08	12,44	2,208	1,896	1,587	1,287
17	7,566	8,841	10,60	13,14	2,247	1,923	1,604	1,294
18	7,882	9,238	11,12	13,84	2,284	1,948	1,619	1,301
19	8,192	9,631	11,63	14,54	2,319	1,973	1,633	1,307
20	8,498	10,02	12,14	15,23	2,354	1,996	1,648	1,313
21	8,803	10,40	12,64	15,93	2,387	2,019	1,661	1,319
22	9,097	10,78	13,14	16,61	2,418	2,041	1,674	1,324
23	9,390	11,15	13,64	17,30	2,449	2,062	1,688	1,330
24	9,680	11,53	14,13	17,97	2,479	2,082	1,698	1,335
25	9,967	11,89	14,62	18,65	2,508	2,102	1,710	1,340
26	10,25	12,26	15,10	19,34	2,537	2,121	1,721	1,345
27	10,53	12,62	15,58	20,01	2,564	2,140	1,732	1,349
28	10,81	12,98	16,07	20,68	2,591	2,158	1,743	1,354
29	11,08	13,33	16,54	21,36	2,617	2,175	1,753	1,358
30	11,35	13,68	17,02	22,02	2,643	2,192	1,763	1,362
31	11,62	14,03	17,49	22,69	2,667	2,209	1,773	1,366
32	11,89	14,38	17,96	23,35	2,692	2,225	1,782	1,370
33	12,15	14,69	18,43	24,01	2,715	2,241	1,792	1,374
34	12,42	15,06	18,89	24,68	2,739	2,256	1,800	1,378
35	12,67	15,41	19,35	25,34	2,761	2,272	1,809	1,382
36	12,93	15,74	19,81	25,99	2,784	2,287	1,817	1,385
37	13,19	16,07	20,26	26,65	2,806	2,301	1,826	1,389
38	13,44	16,41	20,72	27,30	2,827	2,315	1,834	1,392
39	13,69	16,74	21,18	27,95	2,848	2,329	1,842	1,395
40	13,94	17,07	21,63	28,60	2,869	2,343	1,850	1,398

Теплоемкость

$$c = c_v \frac{n-k}{n-1}.$$

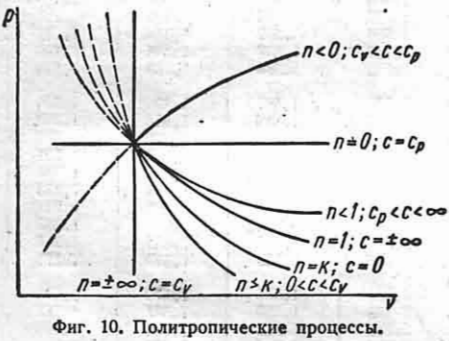
Зависимость теплоемкости от показателя политропы $c = f(n)$ может быть представлена графически (фиг. 9). При $n \to \infty$ теплоемкость асимптотически приближается к c_v, а при $n \to 1-$ соответственно к $\pm\infty$.



Фиг. 9. Зависимость теплоемкости от показателя политропы.

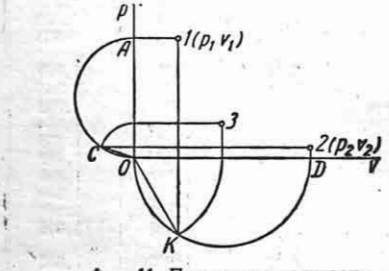
Протекание характерных политропических процессов см. фиг. 10.

Построение политропы. Построение по способу Толле проводится по двум точкам и основано на том, что средние геометрические величины объемов и давлений двух произвольных точек политропы определяют объем и давление



Фиг. 10. Политропические процессы.

в некоторой промежуточной точке, принадлежащей той же политропе (фиг. 11).



Фиг. 11. Построение политропы.

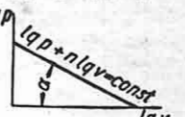
Для того чтобы по двум точкам *1* и *2* политропы построить точку *3*, на отрезках $OA = p_1$ и $OD = v_2$ строят две полуокружности. Из точек *1* и *2* проводят до пересечения с окружностями в точках K и C вертикаль $1-K$ и горизонталь $2-C$. Начало координат соединяют с точками K и C; полученные при этом отрезки OK и OC — параметры v_3 и p_3 промежуточной точки политропы *3*. При этом $v_3 = \sqrt{v_1 \cdot v_2}$, $p_3 = \sqrt{p_1 p_2}$.

Более точно построение политропы проводится по точкам, параметры которых определяются вычислением.

Определение показателя политропы *n*

1. Если параметры двух точек политропы — соответственно p_1, v_1 и p_2, v_2, то

$$n = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg v_2 - \lg v_1}.$$



Фиг. 12.

2. Из уравнения $pv^n = \text{const}$ следует, что $\lg p + n \lg v = \text{const}$, т. е. в координатах $\lg p - \lg v$ (фиг. 12) политропа изображается прямой, тангенс угла наклона которой равен показателю n:

$$n = \operatorname{tg} \alpha.$$

ЦИКЛЫ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Круговые процессы или циклы. Циклы бывают прямые и обратные. Осуществление цикла требует наличия двух тепловых источников: источника тепла и холодильника. В прямом цикле к рабочему телу подводится тепло от источника тепла q_1; в работу превращается часть подведенного тепла $q_1 - q_2$, где q_2 — тепло, отдаваемое рабочим телом холодильнику. Работа кругового цикла графически изображается в координатах $p - v$ площадью, заключенной внутри замкнутого контура цикла. Линия расширения лежит выше линии сжатия. По этому циклу работают тепловые двигатели. Экономичность цикла определяется термическим коэффициентом полезного действия теплового двигателя.

Термическим к. п. д. цикла называется отношение теплоты, превращенной в работу, ко всей теплоте, затраченной в идеальной машине:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{Al}{q_1}.$$

В обратном круговом цикле линия расширения лежит ниже линии сжатия.

Затрачивается внешняя работа, и в результате этого тепло передается от холодильника к источнику тепла. По этому циклу работают холодильные машины.

В результате совершения кругового процесса (цикла) внутренняя энергия не изменяется.

Цикл Карно протекает по двум изотермам и двум адиабатам, изображенным на фиг. 13 и 14, где *1 — 2* — изотермическое расширение с подводом тепла q_1 от источника с температурой T_1; *2 — 3* — адиабатическое расширение от T_1 до T_2; *3 — 4* — изотермическое сжатие с отдачей тепла q_2 холодильнику при температуре T_2; *4 — 1* — адиабатическое сжатие от T_2 до T_1.

Соотношение параметров в процессах:

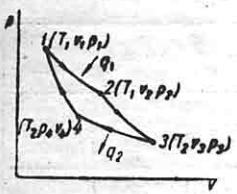
$$1-2:\ T_1 = \text{const};\quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1};$$

$$2-3:\ \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{p_2}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}};$$

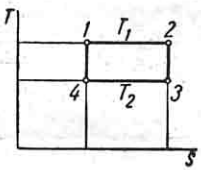
$$3-4:\ T_2 = \text{const};\quad \frac{v_3}{v_4} = \frac{p_4}{p_3};$$

$$4-1:\ \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_4}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{p_1}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Термический к. п. д. цикла Карно $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ не зависит от природы рабочего тела, а определяется



Фиг. 13. Цикл Карно.



Фиг. 14.

лишь температурами источника тепла T_1 и холодильника T_2 и в этом интервале температур является наивысшим для любой тепловой машины.

Работа цикла

$$l = RT_1\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)\ln\frac{v_2}{v_1}\ кГм/кг;$$

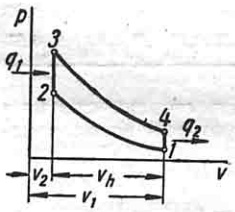
в $p-v$-диаграмме она определяется площадью замкнутого контура *1 — 2 — 3 — 4 — 1*.

$Al = (T_1 - T_2)(s_2 - s_1)$ — тепло, превращенное в полезную работу; в $T-s$-диаграмме определяется площадью замкнутого контура *1 — 2 — 3 — 4 — 1*.

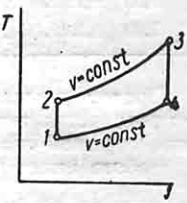
Количество тепла: $q_1 = T_1(s_2 - s_1)$; $q_2 = T_2(s_2 - s_1)$.

ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цикл с подводом тепла при v=const показан на фиг. 15 и 16, где *1 — 2* — адиабата сжатия; *2 — 3* — изохора с подводом тепла q_1; *3 — 4* — адиабата расширения; *4 — 1* — изохора с отнятием тепла q_2.



Фиг. 15. Цикл с подводом тепла при v = const.



Фиг. 16.

Соотношение параметров в процессах:

$$1-2:\ \frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1};\quad \frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^k;$$

$$2-3:\ \frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda;$$

$$3-4:\ \frac{T_3}{T_4} = \varepsilon^{k-1};\quad \frac{p_3}{p_4} = \varepsilon^k;$$

$$4-1:\ \frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1} = \lambda.$$

Рабочий объем

$$v_h = \frac{\pi}{4}D^2S,$$

где D — диаметр цилиндра; S — ход поршня;

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{v_2 + v_h}{v_2} = \varepsilon;\quad v_2 = \frac{v_h}{\varepsilon - 1}.$$

Полный объем

$$v_1 = v_2 \cdot \varepsilon = \frac{v_h \cdot \varepsilon}{\varepsilon - 1},$$

где $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ — степень сжатия; $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ — степень повышения давления.

Термический к. п. д. $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$;

значения η_t даны в табл. 3.

Таблица 3

Термический к. п. д. цикла с подводом тепла при $v = \text{const}$ [16]

Показатель адиабаты k	Степень сжатия ε								
	2	3	4	6	8	10	12	14	16
1,30	0,19	0,28	0,34	0,42	0,46	0,50	0,53	0,55	0,57
1,35	0,22	0,35	0,41	0,47	0,52	0,55	0,58	0,60	0,62
1,40	0,25	0,36	0,43	0,52	0,57	0,61	0,63	0,65	0,67

Предел повышения степени сжатия ε определяется температурой воспламенения горючей смеси.

Работа цикла

$$l = \frac{p_1 v_h (\varepsilon^k - \varepsilon)(\lambda - 1)}{(k-1)(\varepsilon - 1)},$$

или

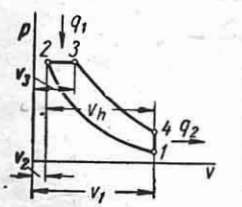
$$l = 427 c_v T_1 (\lambda - 1)(\varepsilon^{k-1} - 1).$$

Количество тепла

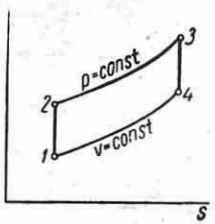
$$q_1 = c_v T_1 \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1);$$

$$q_2 = c_v T_1 (\lambda - 1);$$

$Al = q_1 - q_2$ в $T - s$-диаграмме определяется площадью замкнутого контура $1-2-3-4-1$.



Фиг. 17. Цикл с подводом тепла при p=const.



Фиг. 18.

Среднее индикаторное давление (среднее давление на $p - v$-диаграмме)

$$p_i = \frac{l}{v_h} = \frac{p_1 (\varepsilon^k - \varepsilon)(\lambda - 1)}{(k-1)(\varepsilon - 1)}.$$

Цикл с подводом тепла при p=const изображен на фиг. 17 и 18, где $1-2$ — адиабата сжатия; $2-3$ — изобара с подводом тепла q_1; $3-4$ — адиабата расширения; $4-1$ — изохора с отнятием тепла q_2.

Соотношение параметров в процессах:

$1-2$: $\frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1}$; $\frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^k$;

$2-3$: $\frac{T_3}{T_2} = \rho$; $p_3 = p_2$;

$3-4$: $\frac{T_3}{T_4} = \frac{\varepsilon^{k-1}}{\rho^{k-1}}$; $\frac{p_3}{p_4} = \frac{\varepsilon^k}{\rho^k}$;

$4-1$: $\frac{T_4}{T_1} = \rho^k$; $\frac{p_4}{p_1} = \rho^k$.

Объем газа

$$v_2 = \frac{v_h}{\varepsilon - 1}; \quad v_3 = \rho v_2 = \frac{v_h \rho}{\varepsilon - 1};$$

$$v_1 = \frac{v_h \cdot \varepsilon}{\varepsilon - 1},$$

где $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ — степень сжатия; $\rho = \frac{v_3}{v_2}$ — степень предварительного расширения.

Термический к. п. д.

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k\varepsilon^{k-1}(\rho - 1)};$$

значения его даны в табл. 4.

Таблица 4

Термический к. п. д. цикла с подводом тепла при $p = \text{const}$, $k = 1{,}35$ [16]

Степень предварительного расширения ρ	Степень сжатия ε			
	10	12	14	16
1,5	0,52	0,54	0,57	0,59
2,1	0,49	0,52	0,55	0,57
2,5	0,46	0,49	0,52	0,54

В цикле с подводом тепла при p=const сжатию подвергается чистый воздух, благодаря чему степень сжатия может быть повышена до $\varepsilon = 14 \div 16$.

Количество тепла

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = c_p T_1 \varepsilon^{k-1} (\rho - 1);$$

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = c_v T_1 (\rho^k - 1).$$

Работа цикла

$$l = 427\,[c_p\,(T_3 - T_2) - c_v\,(T_4 - T_1)] = 427 c_v T_1\,[k\varepsilon^{k-1}\,(\rho - 1) - (\rho^k - 1)],$$

или

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1}\,[k\varepsilon^{k-1}\,(\rho - 1) - (\rho^k - 1)],$$

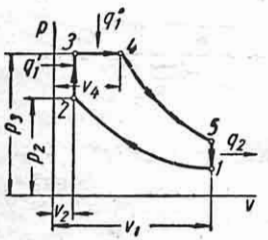
или

$$l = \frac{p_1 v_h \varepsilon}{(k-1)(\varepsilon - 1)} \times \times\,[k\varepsilon^{k-1}\,(\rho - 1) - (\rho^k - 1)].$$

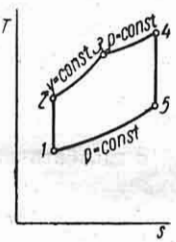
Среднее индикаторное давление

$$p_i = \frac{l}{v_h} = \frac{p_1 \varepsilon\,[k\varepsilon^{k-1}\,(\rho - 1) - (\rho^k - 1)]}{(k-1)\,(\varepsilon - 1)}.$$

Цикл со смешанным подводом тепла при $v = \text{const}$ *и* $p = \text{const}$ показан на фиг. 19 и 20, где *1—2*—адиабата сжатия



Фиг. 19. Цикл со смешанным подводом тепла при $v = \text{const}$ и $p = \text{const}$.



Фиг. 20.

2—3—изохора с подводом части тепла q'_1;

3—4—изобара с подводом части тепла q''_1;

4 – 5 — адиабата расширения; *5—1* — изохора с отводом тепла q_2.

Соотношение параметров в процессах:

$$1-2:\ \frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1};\quad \frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^k;$$

$$2-3:\ \frac{T_3}{T_2} = \lambda;\quad \frac{p_3}{p_2} = \lambda;$$

$$3-4:\ \frac{T_4}{T_3} = \rho;\quad p_4 = p_3;$$

$$4-5:\ \frac{T_4}{T_5} = \frac{\varepsilon^{k-1}}{\rho^{k-1}};\quad \frac{p_4}{p_5} = \frac{\varepsilon^k}{\rho^k};$$

$$5-1:\ \frac{T_5}{T_1} = \lambda\rho^k;\quad \frac{p_5}{p_1} = \lambda\rho^k.$$

Объем газа

$$v_2 = \frac{v_h}{\varepsilon - 1};\quad v_4 = \frac{v_h \cdot \rho}{\varepsilon - 1};$$

$$v_1 = v_5 = \frac{v_h \varepsilon}{\varepsilon - 1}.$$

Термический к. п. д.

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1}\,[(\lambda - 1) + k\lambda\,(\rho - 1)]}.$$

Количество тепла:

$$q'_1 = c_v\,(T_3 - T_2);$$

$$q''_1 = c_p\,(T_4 - T_3);$$

$$q_1 = q'_1 + q''_1 = c_v T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}\,[(\lambda - 1) + k\lambda\,(\rho - 1)];$$

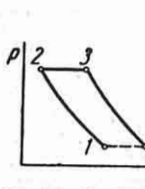
$$q_2 = c_v\,(T_5 - T_1) = c_v T_1\,(\rho^k \lambda - 1).$$

Работа цикла

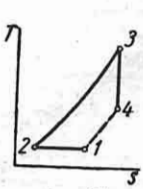
$$l = 427\,(q_1 - q_2).$$

Двигатель, работающий по циклу со смешанным подводом тепла при $v = \text{const}$ и $p = \text{const}$, имеет следующие преимущества: 1) *по сравнению с двигателем с подводом тепла при* $v = \text{const}$ в этом двигателе допускаются бо́льшие степени сжатия; двигатель работает на менее дефицитном тяжелом жидком топливе; 2) *по сравнению с двигателем с подводом тепла при* $p = \text{const}$ в двигателе со смешанным подводом тепла отсутствует специальный компрессор, распыливающий топливо, и расход энергии на него.

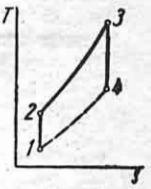
Циклы турбин внутреннего сгорания. *Турбина внутреннего сгорания при* $p = \text{const}$. Цикл показан на фиг. 21, 22 и 23, где *1 — 2* — сжатие воздуха в компрессоре — изотермическое (фиг. 22) или адиабатическое (фиг. 23); *2 — 3* — изобарический подвод тепла (сгорание



Фиг. 21. Цикл турбины внутреннего сгорания при $p = \text{const}$.



Фиг. 22.



Фиг. 23.

топлива); *3 — 4* — адиабатическое расширение; *4 — 1* — условный изобарический процесс, замыкающий цикл.

Термический к. п. д. цикла турбины с изотермическим сжатием (табл. 5)

$$\eta_t = 1 - \frac{\beta^{\frac{k-1}{k}}\left[\frac{k-1}{k}\ln\beta - 1\right] + \rho}{\beta^{\frac{k-1}{k}}(\rho - 1)},$$

где $\rho = \frac{v_3}{v_2}$ — степень предварительного расширения; $\beta = \frac{p_2}{p_1}$ — степень увеличения давления.

Таблица 5

Величина η_t при среднем значении $k = 1{,}35$ для турбины с изотермическим сжатием (для разных ρ и β) [16]

Степень предварительного расширения ρ	Степень увеличения давления β					
	2	4	6	10	14	20
2	0,150	0,240	0,277	0,301	0,308	0,307
3	0,158	0,272	0,323	0,375	0,401	0,435
4	0,160	0,282	0,339	0,400	0,430	0,473
5	0,161	0,286	0,348	0,412	0,447	0,492
7	0,162	0,291	0,355	0,425	0,463	0,512

Термический к. п. д. цикла турбины с адиабатическим сжатием

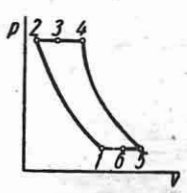
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Величина η_t при среднем значении $k = 1{,}35$ для турбин с адиабатическим сжатием (для разных β):

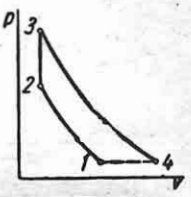
β	2	4	6	8	10	12	16	20
η_t	0,162	0,292	0,371	0,416	0,448	0,474	0,512	0,538

Турбина внутреннего сгорания может быть осуществлена с регенерацией тепла, т. е. с предварительным подогревом сжатого в компрессоре воздуха теплом выхлопных газов; на фиг. 24: *2 — 3* — изобарический подогрев воздуха в регенераторе; *5 — 6* — изобарическое охлаждение продуктов сгорания в регенераторе.

Полной регенерацией называется такой идеальный процесс, при котором все располагаемое тепло выхлопных газов используется для подогрева воздуха.



Фиг. 24. Цикл турбины внутреннего сгорания с регенерацией тепла.



Фиг. 25. Цикл турбины внутреннего сгорания при $v = \text{const}$.

Введение регенерации значительно повышает термический к. п. д. циклов турбин, который при благоприятных условиях достигает величины 0,75.

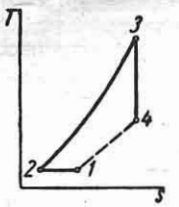
Термический к. п. д. цикла турбины с полной регенерацией с изотермическим сжатием

$$\eta_{t\,max} = 1 - \frac{\frac{k-1}{k}T_1\ln\beta}{T_5\left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)};$$

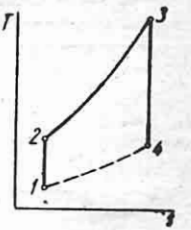
с адиабатическим сжатием

$$\eta_{t\,max} = 1 - \frac{T_1}{T_5}.$$

Турбина внутреннего сгорания при $v = \text{const}$; цикл ее изображен на фиг. 25, 26 и 27, где *1 — 2* — сжатие воздуха в компрессоре — изотермическое (фиг. 26)



Фиг. 26.



Фиг. 27.

или адиабатическое (фиг. 27); *2 — 3* — подвод тепла при постоянном объеме (сгорание топлива); *3 — 4* — адиабатическое расширение до атмосферного давления; *4 — 1* — условный изобарический процесс, замыкающий цикл.

Термический к. п. д. цикла турбины с изотермическим сжатием (табл. 6)

$$\eta_t = 1 - \frac{(k-1)\ln\beta + k\left(\frac{\lambda^{\frac{1}{3}}}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} - 1\right)}{\lambda - 1},$$

где $\beta = \frac{p_2}{p_1}$ — степень увеличения давления; $\lambda = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$ — степень добавочного увеличения давления.

Таблица 6

Величина η_t при среднем значении $k = 1{,}35$ для турбин с изотермическим сжатием [16]

Степень увеличения давления β	Степень добавочного увеличения давления λ					
	2	3	4	5	6	7
2	0,232	0,286	0,329	0,346	0,371	0,388
3	0,265	0,336	0,386	0,401	0,423	0,442
4	0,297	0,371	0,421	0,441	0,462	0,479
5	0,307	0,393	0,442	0,465	0,497	0,504

Термический к. п. д. цикла турбины с адиабатическим сжатием (табл. 7)

$$\eta_t = 1 - \frac{k\left(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1\right)}{(\lambda - 1)\,\beta^{\frac{k-1}{k}}}.$$

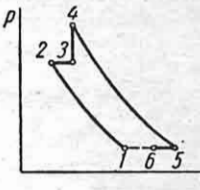
Таблица 7

Величина η_t при среднем значении $k = 1{,}35$ для турбин с адиабатическим сжатием [16]

Степень увеличения давления β	Степень добавочного увеличения давления λ					
	2	3	4	5	6	7
2	0,246	0,292	0,334	0,352	0,372	0,389
3	0,321	0,362	0,401	0,416	0,434	0,451
4	0,372	0,410	0,446	0,460	0,477	0,492
5	0,409	0,441	0,478	0,492	0,508	0,522

Введение регенерации может повысить к. п. д. циклов турбин при благоприятных условиях до $\eta_t \approx 0{,}8$ при изотермическом сжатии и до $\eta_t \approx 0{,}73$ при адиабатическом сжатии.

Цикл турбины с регенерацией тепла изображен на фиг. 28, где *2—3* — изобарический нагрев сжатого воздуха в регенераторе; *5—6* — изобарическое охлаждение продуктов сгорания в регенераторе.



Фиг. 28. Цикл турбины с регенерацией тепла.

Термический к. п. д. цикла с полной регенерацией и изотермическим сжатием

$$\eta_{t\,max} = 1 - \frac{(k-1)\ln\beta}{\gamma_{max}\left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)},$$

где $\gamma_{max} = \frac{T_5}{T_1}$ — предельная степень регенерации. Термический к. п. д. цикла турбины с полной регенерацией и адиабатическим сжатием

$$\eta_{t\,max} = 1 - \frac{kT_1\left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{T_5\left(\beta^{k-1} - 1\right)}.$$

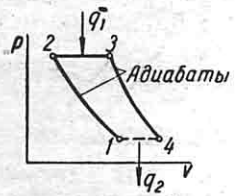
ЦИКЛЫ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основоположник научной теории полета при помощи реактивного двигателя — выдающийся русский ученый-изобретатель К. Э. Циолковский. Им впервые в мире в 1903 г. была разработана теория полета ракеты и изобретен первый жидкостный реактивный двигатель. К. Э. Циолковскому принадлежит также первенство и по другим изобретениям в реактивной технике. Многое сделали для развития реактивных двигателей и другие русские ученые-новаторы.

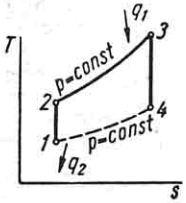
Реактивные двигатели работают по тем же циклам, что и газовые турбины.

Цикл бескомпрессорного двигателя со сгоранием топлива при $p = \text{const}$ (прямоточный) изображен на фиг. 29 и 30, где *1 — 2* — адиабатическое сжатие воздуха в диффузоре, происходящее благодаря большой скорости движения аппарата; *2—3* — подвод тепла при постоянном давлении — сгорание топлива в камере сгорания; *3 — 4* — адиабатическое

расширение продуктов сгорания в сопле, создание кинетической энергии потока и реактивного усилия, направленного в сторону, противоположную движению потока; $4-1$ — условный замыкающий процесс с отводом тепла — охлаждение продуктов сгорания, удаленных в атмосферу, до температуры окружающей среды.



Фиг. 29. Цикл бескомпрессорного двигателя (со сгоранием топлива) при $p = \text{const}$.



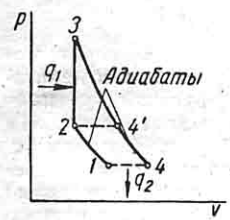
Фиг. 30.

Термический к. п. д. цикла

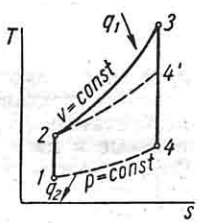
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

где $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ — степень сжатия.

Цикл бескомпрессорного двигателя со сгоранием топлива при $v = \text{const}$ (пульсирующий двигатель) изображен на фиг. 31 и 32, где $1-2$ — адиабатическое сжатие воздуха в диффузоре, использующее поступательную скорость двигателя и поступление воздуха в камеру сгорания; при достижении давления p_2 прекращается поступление воздуха и топлива в камеру, топливо воспламеняется от искры; $2-3$ — подвод тепла при $v = \text{const}$ — сгорание топлива в камере сгорания; $3-4'$ — адиабатическое расширение продуктов сгорания в сопле при закрытом клапане диффузора, $p'_4 = p_2$; $4'-4$ — адиабатическое расширение продуктов сгорания при открытом клапане; в процессе $3-4'-4$ создается реактивное усилие, направленное в сторону, противоположную движению потока; $4-1$ — условный замыкающий процесс с отводом тепла — охлаждение продуктов сгорания, удаленных в атмосферу, до температуры окружающей среды.



Фиг. 31. Цикл бескомпрессорного двигателя со сгоранием топлива при $v = \text{const}$.



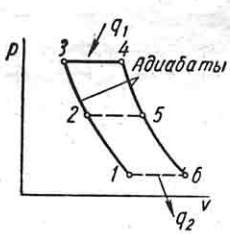
Фиг. 32.

Термический к. п. д.

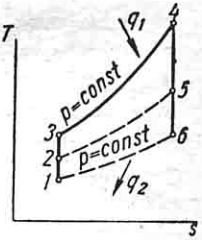
$$\eta_t = 1 - \frac{k\left(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1\right)}{\lambda - 1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

где $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ — степень сжатия; $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ — степень повышения давления.

Реактивный газотурбинный двигатель. Для повышения степени сжатия, а следовательно, и термического к. п. д., кроме сжатия в диффузоре с использованием скоростного напора воздуха, рабочее тело сжимается дополнительно в компрессоре, приводимом в действие газовой турбиной; цикл изображен на фиг. 33 и 34, где $1-2$ — адиабатическое сжатие в диффузоре; $2-3$ — адиабатическое сжатие в компрессоре; $3-4$ — подвод тепла при сгорании топлива в камере сгорания; $4-5$ — адиабатическое расширение в газовой турбине, приводящей в движение компрессор и топливный насос; $5-6$ — адиабатическое расширение в сопле с созданием реактивного усилия; $6-1$ — отвод тепла (условный замыкающий процесс) — охлаждение продуктов сгорания, удаленных в атмосферу, до температуры окружающей среды.



Фиг. 33. Цикл реактивного газотурбинного двигателя.



Фиг. 34.

Давление в точках 2 и 5 может быть различным. Термический к. п. д.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

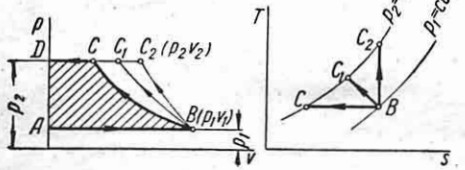
Для повышения экономичности цикла реактивного двигателя вводится регенерация тепла со ступенчатым подводом тепла.

Несмотря на значительное повышение термического к. п. д. цикла от введения регенерации, трудности, связанные с увеличением веса двигателя, а также трудность создания теплообменников малых габаритов с малым сопротивлением ограничивают широкое распространение регенерации в реактивной технике.

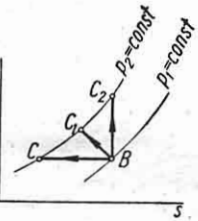
ПРОЦЕСС СЖАТИЯ В ОДНОЦИЛИНДРОВОМ КОМПРЕССОРЕ

Компрессорами называются машины, предназначенные для сжатия газообразных тел.

На фиг. 35 представлен процесс сжатия воздуха в компрессоре, где $A-B$ — всасывание в цилиндр атмосферного воздуха при $p_1 = \text{const}$; $B-C$ — сжатие воздуха по изотерме или по адиабате



Фиг. 35. Процессы сжатия воздуха в компрессоре.



Фиг. 36.

($B-C_2$) или по политропе ($B-C_1$); $C-D$ — нагнетание в резервуар при $p_2 = \text{const}$ (или C_1-D или C_2-D).

Отнятие тепла от воздуха при сжатии осуществляется охлаждением стенок цилиндра компрессора водой.

С увеличением интенсивности охлаждения воздуха линия сжатия отклоняется от адиабаты $B-C_2$ к изотерме $B-C$. Обычно в компрессорах осуществляется политропическое сжатие воздуха с показателем политропы n, равным 1,2—1,25.

В $T-s$-диаграмме процесс сжатия изображается в виде графиков, приведенных на фиг. 36.

Температура сжатого воздуха определяется по формуле

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

При начальной температуре воздуха $t_1 = 20°$ С температура сжатого воздуха t_2 принимает значения, приведенные в табл. 8.

Таблица 8

Температура сжатого воздуха в °С [3]

Процесс сжатия	Значения $\frac{p_2}{p_1}$								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Адиабатический	85	124	160	190	214	235	254	272	289
Политропический ($n=1{,}2$)	44	78	98	111	123	132	141	150	157

Обычно одноцилиндровый компрессор применяется для получения сжатого воздуха давлением не больше 10 *ата*.

Работа, расходуемая (теоретически) на сжатие воздуха в компрессоре (табл. 9),

Таблица 9

Расход работы (в *кГм*) на получение в компрессорной установке 1 $м^3$ сжатого и охлажденного воздуха при $p_1 = 1$ *ата* [3]

Процесс сжатия	Значения p_2 в *ата*								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Изотермический	13 818	33 163	55 272	80 605	108 241	138 180	165 816	198 058	230 300
Политропический	14 400	36 000	62 400	93 000	126 000	159 600	198 800	237 600	222 000
Адиабатический	14 700	38 850	68 600	99 750	144 900	181 300	226 800	274 050	325 500

изображается в системе координат $p - v$ площадью $ABCD$ (фиг. 35).

Для изотермического сжатия

$$n = 1; \quad l = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$l = p_2 v_2 \ln \frac{p_2}{p_1} = 2{,}303 p_2 v_2 \lg \frac{p_2}{p_1}.$$

Для адиабатического сжатия

$$n = k; \quad l = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

$$l = \frac{k}{k-1} p_2 v_2 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right];$$

$$l = 427 (i_2 - i_1).$$

Для политропического сжатия

$$l = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$

$$l = \frac{n}{n-1} p_2 v_2 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right].$$

Обычно воздух после сжатия проходит через холодильник, в котором он охлаждается при постоянном давлении до начальной температуры T_1. Тогда для адиабатического сжатия

$$l = \frac{k}{k-1} p_2 v \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

для политропического сжатия

$$l = \frac{n}{n-1} p_2 v \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right],$$

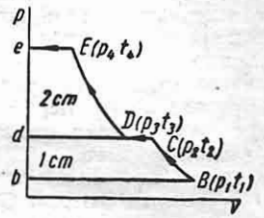
где v — объем воздуха, сжатого до давления p_2 и охлажденного до температуры T_1.

Количество тепла, отдаваемое 1 *кг* воздуха в холодильнике,

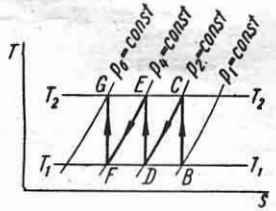
$$q = c_p (T_2 - T_1) = c_p \left[T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - T_1 \right] =$$

$$= c_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$

Многоступенчатый компрессор. Для получения сжатого воздуха высокого давления применяются многоцилиндровые или многоступенчатые компрессоры, в которых воздух сжимается последовательно в нескольких цилиндрах с промежуточным охлаждением его после сжатия в каждом цилиндре; на фиг. 37 $b - B$ — всасывание атмосферного воздуха в первый цилиндр при $p_1 = \text{const}$; $B - C$ — сжатие воздуха в первом цилиндре; $C - d$ — нагнетание воздуха в первый холодильник при $p_2 = \text{const}$; $d - D$ — всасывание охлажденного сжатого воздуха из холодильника во второй цилиндр; $C - D$ — охлаждение воздуха в первом холодильнике;

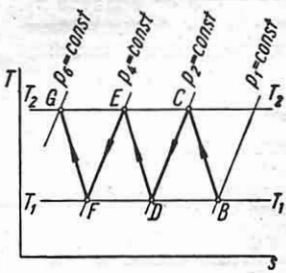


Фиг. 37. Цикл многоступенчатого компрессора.



Фиг. 38. Процесс сжатия в многоступенчатом компрессоре.

$D - E$ — сжатие воздуха во втором цилиндре; $E - e$ — нагнетание сжатого во втором цилиндре воздуха через второй холодильник в резервуар при $p_4 = \text{const}$.



Фиг. 39.

Процесс сжатия в многоступенчатом компрессоре может быть изображен в диаграмме $T - s$ (фиг. 38 — для адиабатического сжатия, фиг. 39 — для политропического сжатия).

При охлаждении воздуха в холодильниках до начальной температуры T_1 и при изобарическом процессе охлаждения:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_2} = \frac{p_6}{4} = x;$$

$$x^3 = \frac{p_6}{p_1} = \frac{p_{конечное}}{p_{начальное}};$$

при $p_1 = 1$ *ата* и m ступенях $x = \sqrt[m]{p_{конечное}}$, т. е. допустимое увеличение давления при сжатии в отдельных ступенях компрессора определяется корнем m-й степени из давления сжатого воздуха.

Работа, расходуемая на сжатие воздуха в многоступенчатом компрессоре при m ступенях,

$$l = ml_1,$$

где l_1 — работа, расходуемая на сжатие в каждой из ступеней.

Для политропического сжатия

$$l = m \frac{n}{n-1} RT_1 \left(x^{\frac{n-1}{n}} - 1\right).$$

Для адиабатического сжатия

$$l = m \frac{k}{k-1} RT_1 \left(x^{\frac{k-1}{k}} - 1\right),$$

или

$$l = m \cdot 427 \, (i_2 - i_1),$$

где i_1 и i_2 — энтальпия воздуха до и после сжатия в первой ступени.

Количество тепла, отдаваемое 1 *кг* воздуха в холодильнике,

$$q = mq_1,$$

где q_1 — теплота, отдаваемая при сжатии в каждой из ступеней; таким образом,

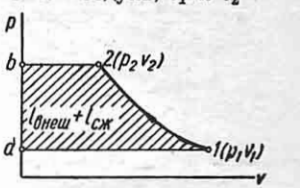
$$q = mc_p T_1 \left(x^{\frac{n-1}{n}} - 1\right).$$

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАГНЕТАТЕЛЬ

Отличительной особенностью центробежных нагнетателей является непрерывность действия. Сжатие воздуха в центробежном нагнетателе происходит за счет сил инерции; на создание потока воздуха через нагнетатель расходуется работа, определяемая из уравнения

$$Al = i_2 - i_1 + A \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + q,$$

где l — работа, расходуемая в нагнетателе на сжатие 1 *кг* воздуха; i_1 и i_2 — энтальпия воздуха соответственно при входе в нагнетатель и при выходе из него; $\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$ — изменение кинетической энергии воздуха при его движении через нагнетатель; q — теплота, отдаваемая воздухом через стенки нагнетателя окружающей среде.



Фиг. 40.

Второе выражение для работы

$$l = l_{внеш} + l_{сжатия} + l_R + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g},$$

где $l_{внешн} = p_2 v_2 - p_1 v_1$ — работа, затрачиваемая на преодоление внешних сил; $l_{сжатия} = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv$ — работа сжатия воздуха по политропе; графически сумма работ $l_{внешн} + l_{сжатия}$ может быть представлена в координатах $p-v$ (см. фиг. 40); l_R — работа, затраченная на преодоление внутренних сопротивлений.

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Реальным газом называется газ, молекулы которого имеют конечный объем, а между молекулами такого газа существуют силы взаимодействия.

Для реального газа уравнение состояния идеального газа $pv = RT$ и законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака не действительны. Впервые отклонение свойств реального газа от идеального газа было установлено и объяснено М. В. Ломоносовым, который в своих „Добавлениях к размышлениям об упругой силе воздуха" (1748 г.) указывал, что вследствие конечного размера частичек газа и взаимного притяжения их „... при очень сильном сжатии... отношение упругостей должно отличаться от отношения плотностей". Лишь через 100 лет с лишним после того, как М. В. Ломо-

носов дал молекулярно-кинетическое толкование свойств реальных газов, были даны уравнения их состояния.

Первое уравнение состояния реального газа было дано Д. И. Менделеевым и опубликовано им в 1873 г. в журнале Русского физико-химического общества.

Уравнение состояния ван-дер-Ваальса (1873 г.)

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT,$$

где a и b — константы, характерные для каждого вещества; $\frac{a}{v^2}$ — величина, учитывающая силы межмолекулярного взаимодействия; b — величина, учитывающая собственный объем молекул газа.

Величины a и b могут быть выражены через критические параметры и, наоборот, критические параметры через a и b по формулам:

$$b = \frac{1}{3} v_k; \quad a = \frac{9}{8} RT_k v_k;$$

$$v_k = 3b; \quad T_k = \frac{8a}{27Rb};$$

$$p_k = \frac{a}{27b^2},$$

где T_k, v_k, p_k — параметры критической точки (см. стр. 38).

Впервые на существование для каждого вещества определенной критической температуры было указано в работе великого русского ученого Д. И. Менделеева, давшего в 1860 г. следующее ее определение: „Абсолютной температурой кипения я называю такую температуру, при которой частицы жидкости вполне теряют свое сцепление (поднятие в капиллярной трубке равняется нулю, скрытое тепло испарение равняется нулю) и при которой жидкость, несмотря ни на какое давление и объем, вся превращается в пар".

Однако уравнение ван-дер-Ваальса, дающее глубокое физическое толкование и наглядно объясняющее связь между газообразным и жидким состоянием вещества, критические явления и другие свойства реальных газов, количественно оказывается совершенно неудовлетворительным в области значительных плотностей и низких температур.

Этот недостаток уравнения ван-дер-Ваальса был исследован в многочисленных работах, которые велись как в поисках аналитических выражений для величин a и b теоретическим путем, так и примитивным подбором функций для них.

Кроме того, существуют эмпирические уравнения состояния, построенные на основе измерения газовых параметров p, v, T, экспериментального исследования эффекта Джоуля-Томсона и исследования теплоемкости c_p реальных газов. Число уравнений состояния, предлагавшихся в разное время различными авторами, достигает ~ 150. Однако, несмотря на их обилие, положение с вопросом о количественно точном и теоретически правильном уравнении состояния оставалось до последнего времени неудовлетворительным.

Трудность построения рационального уравнения состояния заключается в существовании в реальных газах явления ассоциации молекул, т. е. объединения их в комплексы из двух, трех и более молекул. Давно высказанная гипотеза об ассоциации газовых молекул в настоящее время теоретически разработана рядом авторов, в том числе и советскими учеными Вукаловичем, Новиковым, Боголюбовым, Френкелем и др., давшими уравнения состояния ассоциированных реальных газов, хорошо совпадающие с результатами наиболее точных опытных данных.

Закон соответственных состояний. Подставляя в уравнение ван-дер-Ваальса вместо параметров p, v, T приведенные параметры $\pi = \frac{p}{p_k}$; $\varphi = \frac{v}{v_k}$; $\tau = \frac{T}{T_k}$ и выражая константы a и b через p_k, v_k и T_k, получим уравнение

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)(3\varphi - 1) = 8\tau,$$

называющееся приведенным уравнением состояния. В это уравнение входят только π, φ и τ и не входят величины, характеризующие данное тело. Два вещества, состояния которых определяются одинаковыми значениями приведенных параметров, находятся в соответственных состояниях.

ВОДЯНОЙ ПАР

Паром называется реальный газ, близкий к состоянию насыщения, т. е. к превращению в жидкость.

Насыщенным паром называется пар, находящийся в равновесии с жидкостью, из которой он образуется, и имеющий максимальную плотность и упругость. Температура насыщенного пара является функцией одного только давления $t_s = f(p)$.

Сухой насыщенный пар получается при полном испарении всей жидкости.

Влажный насыщенный пар получается при неполном испарении жидкости и является смесью пара с мельчайшими взвешенными в нем капельками жидкости.

Степенью сухости пара x называется весовая доля сухого пара во влажном паре.

Степенью влажности пара y называется весовая доля жидкости во влажном паре.

$$x + y = 1.$$

Состояние влажного пара определяется двумя параметрами — давлением (или температурой) и степенью сухости.

Перегретым паром называется пар, температура которого выше температуры насыщенного пара того же давления.

Температура перегретого пара зависит от давления и объема:

$$t = f(p, v).$$

Степенью перегрева называется разность между температурой перегретого пара и температурой насыщенного пара того же давления. Чем выше степень перегрева пара, тем больше перегретый пар приближается по своим свойствам к газам.

Дальнейшие обозначения: все величины с индексом $(_0)$ соответствуют состоянию жидкости при 0° С; с индексом $(')$ или $(_s)$ — состоянию жидкости при температуре кипения, отвечающей давлению p; с индексом $('')$ — состоянию сухого насыщенного пара; с индексом $(_x)$ — состоянию влажного насыщенного пара; состояние перегретого пара характеризуется параметрами без индексов.

Теплотой жидкости i' называется теплота, расходуемая на нагревание при постоянном давлении 1 *кг* жидкости от 0° С до температуры кипения.

Теплотой парообразования r называется количество тепла, необходимое для превращения 1 *кг* жидкости при температуре кипения в сухой насыщенный пар; в критической точке $r = 0$.

Внешняя теплота парообразования ψ расходуется на совершение работы расширения.

Внутренняя теплота парообразования ρ расходуется на изменение внутренней потенциальной энергии:

$$r = \rho + \psi;$$

$$\psi = Ap(v'' - v');$$

$$\rho = r - Ap(v'' - v').$$

Полной теплотой сухого насыщенного пара i'' называется количество тепла, необходимое для получения при постоянном давлении из воды, имеющей температуру 0° С, 1 *кг* сухого насыщенного пара.

Основные формулы для насыщенного водяного пара. Сухой насыщенный пар. Состояние сухого насыщенного пара определяется одним параметром — его давлением p.

Температура	$t_s = f(p)$
Объем	$v'' = f(p)$
Удельный вес	$\gamma'' = \frac{1}{v''}$
Полная теплота . . .	$i'' = i' + r$
Внутренняя энергия .	$u'' = i' + \rho$; $u'' = i'' - Apv''$
Энтальпия	$i'' = u'' + Apv''$
Энтропия	$s'' = 2{,}303 \lg \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s}$

Влажный насыщенный пар. Состояние влажного насыщенного пара определяется двумя параметрами: давлением p и степенью сухости x.

Температура	$t_s = f(p)$
Объем	$v_x = v'(1-x) + v''\cdot x$; $v_x \approx v''\cdot x$
Удельный вес	$\gamma_x = \frac{1}{v_x}$; $\gamma_x \approx \frac{\gamma''}{x}$
Полная теплота . . .	$i''_x = i' + r\cdot x$
Внутренняя энергия .	$u_x = i' + \rho\cdot x$; $u_x = i_x - Apv_x$
Энтальпия	$i_x = u_x + Apv_x$
Энтропия	$s_x = 2{,}303 \lg \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s}$

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Одно из важнейших приложений второго закона термодинамики.

Уравнение служит для определения объема сухого насыщенного пара v'' или теплоты парообразования r:

$$\frac{r}{T} = A(v''-v')\frac{dp}{dT}.$$

При пользовании уравнением в узких пределах температур производную $\frac{dp}{dT}$ приближенно заменяют отношением $\frac{\Delta p}{\Delta T}$.

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса справедливо также для возгонки и плавления, но в этом случае r должно быть заменено теплотой плавления $r_{плавл}$ или теплотой сублимации $r_{субл}$ и соответственно разность объемов—разностью объемов кристалла и жидкости или кристалла и газа.

Фиг. 41.

Кривые кипения, плавления и сублимации могут быть представлены в координатах $p-T$ (фиг. 41).

Таблицы сухого насыщенного пара. В сокращенных таблицах сухого насыщенного водяного пара, принятых в СССР (составленных проф. М. П. Вукаловичем), даны для давлений от 0,01 до 224 *ата* числовые значения t, v', v'', γ'', i', i'', r, s' и s'' (табл. 10 и 11).

Основные формулы для перегретого водяного пара. Состояние перегретого водяного пара определяется двумя параметрами: давлением p и температурой t.

Температура . . . . . $t = f(p, v)$

Объем . . . . . $v = f(p, t)$

Удельный вес . . . . . $\gamma = \frac{1}{v}$

Полная теплота . . . $i'' = i' + r + c_{p_m}(t - t_s)$

Внутренняя энергия . $u = i' + \rho + c_{p_m} \times (t - t_s) - Ap(v - v'')$;

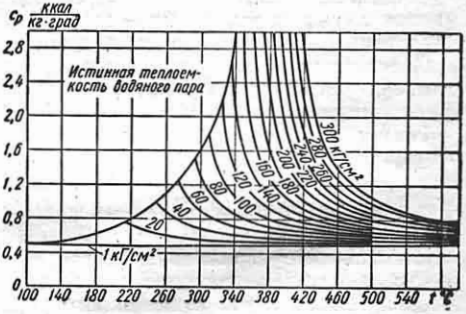
$u = i - Apv$

Энтальпия . . . . . $i = i' + r + c_{p_m} \times (t - t_s) = i'' + c_{p_m} \times (t - t_s)$; $i = u + Apv$

Энтропия . . . . . $s \approx 2{,}3031 \lg \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s} + 2{,}303 c_{p_m} \lg \frac{T}{T_s}$

Уравнение состояния перегретого водяного пара проф. М. П. Вукаловича. В основу термодинамической теории перегретого водяного пара принято предположение о наличии в паре явления ассоциации, состоящего в механическом соединении одиночных молекул пара в одну большую частицу, содержащую две, три и более молекул.

Это явление вызывается силовым взаимодействием между одиночными молекулами, к расчету которого применяется закон действующих масс, выведенный для реального ассоциирующего газа. Этим методом было составлено уравнение состояния для перегретого



Фиг. 42. График теплоемкости перегретого водяного пара.

водяного пара и определены основные термодинамические зависимости, положенные в основу табл. 12—15.

Теплоемкость перегретого водяного пара зависит от температуры и давления. Эта зависимость может быть изображена графически (фиг. 42). Для точных расчетов следует пользоваться таблицами для c_p, c_{p_m} и c_v (см. стр. 68, 70 и 88).

Таблицы перегретого водяного пара. По табл. 12—15 (составлены проф. М. П. Вукаловичем) могут быть найдены в зависимости от давления и температуры значения v, i, s для перегретого водяного пара.

$$pv = 47{,}053T - \frac{1}{v}\left\{63{,}2 + \frac{10\,005}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2{,}468}} - 0{,}039995T + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{v}\left[\frac{8{,}941}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2{,}468}} - \left(1 - \frac{22{,}7}{T^{0{,}5}}\right)\frac{85\,014}{\left(\frac{T}{100}\right)^{5{,}936}}\left(1 + \frac{0{,}0069}{v} - \frac{35{,}57\cdot 10^{-9}}{v^3}\right)\right]\right\};$$

$$l = 494{,}6 + 0{,}3756T + 8{,}5\cdot 10^{-5}\cdot T^2 - \frac{1670}{T} - \frac{1}{v}\left\{0{,}2961 + \frac{104{,}71}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2{,}468}} - 9{,}369\cdot 10^{-5}T + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{v}\left[\frac{5{,}725\cdot 10^{-2}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2{,}468}} - \left(889{,}56 - \frac{21323}{T^{0{,}5}}\right)\cdot\left(1 + \frac{5{,}1\cdot 10^{-8}}{v} - \frac{1{,}89\cdot 10^{-8}}{v^3}\right)\frac{1}{\left(\frac{T}{100}\right)^{5{,}936}}\right]\right\};$$

$$s = 0{,}0753 + 0{,}6111\lg T + 1{,}7\cdot 10^{-4}\cdot T - \frac{835}{T^2} + 0{,}2537\lg v - \frac{1}{v}\left\{9{,}368\cdot 10^{-5} + \right.$$

$$+ \frac{0{,}5784}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}} + \frac{1}{v}\left[\frac{2{,}584\cdot 10^{-4}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}} - \left(5{,}910 - \frac{145{,}457}{T^{0{,}5}}\right)\left(1 + \frac{0{,}0046}{v} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{14{,}228\cdot 10^{-9}}{v^3}\right)\frac{1}{\left(\frac{T}{100}\right)^{6{,}936}}\right]\Bigg\};$$

$$c_v = 0{,}2654 + 1{,}7\cdot 10^{-4}T + \frac{1670}{T^2} + \frac{1}{v}\left\{\frac{2{,}0057}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}} + \right.$$

$$+ \frac{1}{v}\left[\frac{8{,}9613\cdot 10^{-4}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}} - \frac{1}{\left(\frac{T}{100}\right)^{6{,}936}}\left(40{,}992 - \frac{1081{,}62}{T^{0{,}5}}\right)\times\right.$$

$$\left.\left.\times\left(1 + \frac{0{,}0046}{v} - \frac{14{,}228\cdot 10^{-9}}{v^3}\right)\right]\right\};$$

$$c_p = c_v + 0{,}11022\,\frac{\left[1 + \frac{1}{v}\left\{A + \frac{1}{v}\left[B - C\left(1 + \frac{0{,}0069}{v} - \frac{35{,}57\cdot 10^{-9}}{v^3}\right)\right]\right\}\right]^2}{1 - \frac{1}{v}\left\{A_1 + \frac{1}{v}\left[B_1 - C_1\left(1 + \frac{0{,}0092}{v} - \frac{71{,}14\cdot 10^{-9}}{v^3}\right)\right]\right\}},$$

где

$$A = \frac{5{,}2478}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}} + 8{,}5\cdot 10^{-4};\quad B = \frac{4{,}690\cdot 10^{-3}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}};\quad C = \frac{1}{\left(\frac{T}{100}\right)^{6{,}936}}\left(107{,}25 - \frac{2639{,}6}{T^{0{,}5}}\right);$$

$$A_1 = \frac{2{,}6863}{T} + \frac{4{,}2527}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}} - 0{,}0017;\quad B_1 = \frac{5{,}701\cdot 10^{-3}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3{,}468}};$$

$$C_1 = \frac{1}{\left(\frac{T}{100}\right)^{6{,}936}}\left(54{,}203 - \frac{1230{,}4}{T^{0{,}5}}\right).$$

Таблица 10

Насыщенный водяной пар (по температурам) [2]

t в °С	p в кГ/см²	v' в м³/кГ	v'' в м³/кГ	γ'' в кГ/м³	i' в ккал/кГ	i'' в ккал/кГ	r в ккал/кГ	s' в ккал/кГ °К	s'' в ккал/кГ °К
0	0,006228	0,0010002	206,3	0,004847	0	597,3	597,3	0	2,1865
5	0,008891	0,0010001	147,2	0,006793	5,03	599,5	594,5	0,0182	2,1554
10	0,012513	0,0010004	106,42	0,009398	10,04	601,7	591,7	0,0361	2,1256
15	0,017377	0,0010010	77,97	0,01282	15,04	603,9	588,9	0,0536	2,0972
20	0,02383	0,0010018	57,84	0,01729	20,04	606,0	586,0	0,0708	2,0699
25	0,03229	0,0010030	43,40	0,02304	25,03	608,2	583,2	0,0877	2,0438
30	0,04325	0,0010044	32,93	0,03037	30,02	610,4	580,4	0,1043	2,0188
35	0,05733	0,0010061	25,24	0,03962	35,01	612,6	577,6	0,1206	1,9948
40	0,07520	0,0010079	19,55	0,05115	40,01	614,7	574,7	0,1367	1,9719
45	0,09771	0,0010099	15,28	0,06544	45,00	616,8	571,8	0,1525	1,9499
50	0,12578	0,0010121	12,04	0,08306	49,99	619,0	569,0	0,1681	1,9287
55	0,16050	0,0010145	9,578	0,1044	54,98	621,1	566,1	0,1834	1,9084
60	0,2031	0,0010171	7,678	0,1302	59,98	623,2	563,2	0,1985	1,8889
65	0,2550	0,0010199	6,201	0,1613	64,98	625,2	560,2	0,2134	1,8701
70	0,3178	0,0010228	5,045	0,1982	69,98	627,3	557,3	0,2281	1,8521
75	0,3931	0,0010258	4,133	0,2420	74,99	629,3	554,3	0,2426	1,8347
80	0,4829	0,0010290	3,408	0,2934	80,00	631,3	551,3	0,2568	1,8180
85	0,5894	0,0010324	2,828	0,3536	85,02	633,3	548,3	0,2709	1,8018
90	0,7149	0,0010359	2,361	0,4235	90,04	635,2	545,2	0,2848	1,7862
95	0,8619	0,0010396	1,982	0,5045	95,07	637,2	542,1	0,2986	1,7712
100	1,0332	0,0010435	1,673	0,5977	100,10	639,1	539,0	0,3122	1,7566
105	1,2318	0,0010474	1,419	0,7047	105,14	640,9	535,8	0,3256	1,7426
110	1,4609	0,0010515	1,210	0,8264	110,19	642,8	532,6	0,3388	1,7289
115	1,7239	0,0010558	1,036	0,9652	115,25	644,6	529,4	0,3519	1,7157
120	2,0245	0,0010603	0,8917	1,121	120,3	646,4	526,1	0,3649	1,7029
125	2,3666	0,0010649	0,7704	1,298	125,4	648,1	522,7	0,3777	1,6905
130	2,7544	0,0010697	0,6683	1,496	130,5	649,8	519,3	0,3904	1,6784
135	3,192	0,0010747	0,5820	1,718	135,6	651,4	515,8	0,4029	1,6667
140	3,685	0,0010798	0,5087	1,966	140,7	653,0	512,3	0,4154	1,6553
145	4,237	0,0010851	0,4461	2,242	145,8	654,5	508,7	0,4277	1,6442
150	4,854	0,0010906	0,3926	2,547	151,0	656,0	505,0	0,4399	1,6333
155	5,540	0,0010962	0,3466	2,885	156,2	657,5	501,3	0,4520	1,6227
160	6,302	0,0011021	0,3068	3,258	161,3	658,7	497,4	0,4640	1,6124
165	7,146	0,0011081	0,2725	3,670	166,5	660,0	493,5	0,4759	1,6022
170	8,076	0,0011144	0,2426	4,122	171,8	661,3	489,5	0,4877	1,5923
175	9,101	0,0011208	0,2166	4,617	177,0	662,4	485,4	0,4994	1,5825
180	10,225	0,0011275	0,1939	5,157	182,3	663,6	481,3	0,5110	1,5730
185	11,456	0,0011344	0,1739	5,750	187,6	664,6	477,0	0,5225	1,5636
190	12,800	0,0011415	0,1564	6,394	192,9	665,5	472,6	0,5340	1,5543
195	14,265	0,0011489	0,1409	7,097	198,2	666,3	468,1	0,5454	1,5452
200	15,857	0,0011565	0,1272	7,862	203,6	667,1	463,5	0,5567	1,5362
205	17,585	0,0011644	0,1151	8,688	209,0	667,7	458,7	0,5679	1,5273
210	19,456	0,0011726	0,1043	9,588	214,4	668,3	453,9	0,5791	1,5185
215	21,477	0,0011812	0,09465	10,56	219,9	668,8	448,9	0,5903	1,5098
220	23,659	0,0011900	0,08606	11,62	225,4	669,1	443,7	0,6014	1,5011
225	26,007	0,0011992	0,07837	12,76	230,9	669,3	438,4	0,6124	1,4925
230	28,531	0,0012087	0,07147	13,99	236,5	669,5	433,0	0,6234	1,4840
235	31,239	0,0012187	0,06527	15,32	242,2	669,7	427,5	0,6344	1,4756
240	34,140	0,0012291	0,05967	16,76	247,8	669,5	421,7	0,6454	1,4671
245	37,244	0,0012399	0,05462	18,30	253,6	669,4	415,8	0,6563	1,4587
250	40,55	0,0012512	0,05006	19,98	259,3	669,0	409,7	0,6672	1,4503
255	44,10	0,0012631	0,04591	21,78	265,2	668,5	403,3	0,6782	1,4418
260	47,87	0,0012755	0,04215	23,72	271,1	667,9	396,8	0,6891	1,4334
265	51,87	0,0012886	0,03872	25,83	277,1	667,3	390,2	0,7000	1,4249
270	56,14	0,0013023	0,03560	28,09	283,1	666,3	383,2	0,7109	1,4163

Продолжение табл. 10

t в °С	p в кГ/см²	v' в м³/кГ	v'' в м³/кГ	γ'' в кГ/м³	i' в ккал/кГ	i'' в ккал/кГ	r в ккал/кГ	s' в ккал/кГ °К	s'' в ккал/кГ °К
275	60,66	0,0013168	0,03274	30,53	289,2	665,2	376,0	0,7219	1,4077
280	65,46	0,0013321	0,03013	33,19	295,4	663,9	368,5	0,7328	1,3990
285	70,54	0,0013483	0,02774	36,05	301,7	662,4	360,7	0,7439	1,3902
290	75,92	0,0013655	0,02554	39,15	308,1	660,7	352,6	0,7550	1,3812
295	81,60	0,0013839	0,02351	42,53	314,6	658,8	344,2	0,7662	1,3720
300	87,61	0,0014036	0,02164	46,21	321,2	656,6	335,4	0,7774	1,3626
305	93,95	0,001425	0,01992	50,20	328,0	654,2	326,2	0,7888	1,3530
310	100,64	0,001447	0,01832	54,58	334,9	651,4	316,5	0,8003	1,3431
315	107,69	0,001472	0,01683	59,42	342,0	648,3	306,3	0,8120	1,3328
320	115,12	0,001499	0,01545	64,72	349,2	644,9	295,7	0,8239	1,3221
325	122,95	0,001529	0,01417	70,57	356,7	641,0	284,3	0,8360	1,3111
330	131,18	0,001562	0,01297	77,10	364,5	636,7	272,2	0,8484	1,2996
335	139,85	0,001599	0,01184	84,46	372,5	631,8	259,3	0,8612	1,2875
340	148,96	0,001639	0,01078	92,76	380,9	626,2	245,3	0,8743	1,2745
345	158,54	0,001686	0,009771	102,34	389,8	619,9	230,1	0,8881	1,2604
350	168,63	0,001741	0,008805	113,6	399,2	612,5	213,3	0,9025	1,2448
355	179,24	0,001807	0,007869	127,1	409,4	603,6	194,2	0,9181	1,2273
360	190,42	0,001894	0,006943	144,0	420,7	592,6	171,9	0,9354	1,2069
365	202,21	0,00202	0,00599	166,8	434,1	578,2	144,1	0,9556	1,1814
370	214,68	0,00222	0,00493	203	452,0	556,7	104,7	0,9825	1,1453
374	225,22	0,00280	0,00347	288	485,3	512,7	27,4	1,0332	1,0755

Параметры критического состояния: температура 374,15° С, давление 225,65 кГ/см², объем 0,00330 м³/кГ.

Таблица 11

Насыщенный водяной пар (по давлениям) [2]

p в кГ/см²	t в °С	v' в м³/кГ	v'' в м³/кГ	γ'' в кГ/м³	i' в ккал/кГ	i'' в ккал/кГ	r в ккал/кГ	s' в ккал/кГ °К	s'' в ккал/кГ °К
0,010	6,698	0,0010001	131,6	0,007599	6,73	600,2	593,5	0,0243	2,1451
0,015	12,737	0,0010006	89,63	0,01116	12,78	602,9	590,1	0,0457	2,1100
0,020	17,204	0,0010013	68,25	0,01465	17,25	604,9	587,6	0,0612	2,0851
0,025	20,776	0,0010020	55,27	0,01809	20,82	606,4	585,6	0,0734	2,0657
0,030	23,772	0,0010027	46,52	0,02150	23,81	607,8	584,0	0,0835	2,0501
0,040	28,641	0,0010040	35,46	0,02820	28,67	609,8	581,1	0,0998	2,0255
0,050	32,55	0,0010052	28,72	0,03482	32,57	611,5	578,9	0,1126	2,0065
0,060	35,82	0,0010063	24,19	0,04134	35,83	612,9	577,1	0,1232	1,9909
0,080	41,16	0,0010084	18,45	0,05420	41,16	615,2	574,0	0,1404	1,9667
0,10	45,45	0,0010101	14,95	0,06689	45,45	617,0	571,6	0,1539	1,9480
0,12	49,06	0,0010117	12,59	0,07943	49,05	618,6	569,5	0,1652	1,9326
0,15	53,60	0,0010138	10,20	0,09804	53,59	620,5	566,9	0,1791	1,9140
0,20	59,67	0,0010169	7,789	0,1284	59,65	623,1	563,4	0,1975	1,8902
0,25	64,56	0,0010196	6,318	0,1583	64,54	625,0	560,5	0,2121	1,8718
0,30	68,68	0,0010220	5,324	0,1878	68,66	626,8	558,1	0,2242	1,8568
0,40	75,42	0,0010261	4,066	0,2459	75,41	629,5	554,1	0,2438	1,8333

Продолжение табл. 11

p в кГ/см²	t в °С	v' в м³/кГ	v'' в м³/кГ	γ'' в кГ/м³	i' в ккал/кГ	i'' в ккал/кГ	r в ккал/кГ	s' в ккал/кГ °К	s'' в ккал/кГ °К
0,50	80,86	0,0010296	3,299	0,3031	80,86	631,6	550,7	0,2592	1,8152
0,60	85,45	0,0010327	2,782	0,3595	85,47	633,5	548,0	0,2722	1,8001
0,70	89,45	0,0010355	2,408	0,4153	89,49	635,1	545,6	0,2833	1,7879
0,80	92,99	0,0010381	2,125	0,4706	93,05	636,4	543,3	0,2931	1,7772
0,90	96,18	0,0010405	1,903	0,5255	96,26	637,6	541,3	0,3018	1,7677
1,0	99,09	0,0010428	1,725	0,5797	99,19	638,8	539,6	0,3097	1,7593
1,1	101,76	0,0010448	1,578	0,6337	101,87	639,8	537,9	0,3169	1,7517
1,2	104,25	0,0010468	1,455	0,6873	104,38	640,7	536,3	0,3236	1,7447
1,3	106,56	0,0010487	1,350	0,7407	106,72	641,6	534,9	0,3297	1,7382
1,4	108,74	0,0010505	1,259	0,7943	108,92	642,3	533,4	0,3355	1,7323
1,5	110,79	0,0010522	1,181	0,8467	110,99	643,1	532,1	0,3409	1,7268
1,6	112,73	0,0010538	1,111	0,9001	112,95	643,8	530,8	0,3460	1,7217
1,7	114,57	0,0010554	1,050	0,9524	114,81	644,5	529,7	0,3503	1,7168
1,8	116,33	0,0010570	0,9954	1,0046	116,60	645,1	528,5	0,3554	1,7123
2,0	119,62	0,0010600	0,9018	1,109	119,94	646,3	526,4	0,3639	1,7039
2,2	122,65	0,0010627	0,8248	1,212	123,0	647,3	524,3	0,3717	1,6963
2,4	125,46	0,0010653	0,7603	1,315	125,9	648,3	522,4	0,3789	1,6894
2,6	128,08	0,0010678	0,7055	1,417	128,5	649,2	520,7	0,3855	1,6830
2,8	130,55	0,0010703	0,6581	1,520	131,1	650,0	518,9	0,3918	1,6771
3,0	132,88	0,0010726	0,6169	1,621	133,4	650,7	517,3	0,3976	1,6717
3,2	135,03	0,0010748	0,5807	1,722	135,7	651,4	515,7	0,4031	1,6665
3,4	137,18	0,0010769	0,5486	1,823	137,8	652,1	514,3	0,4084	1,6617
3,6	139,18	0,0010789	0,5199	1,923	139,9	652,8	512,9	0,4134	1,6572
3,8	141,09	0,0010809	0,4942	2,024	141,8	653,3	511,5	0,4181	1,6529
4,0	142,92	0,0010829	0,4709	2,124	143,7	653,9	510,2	0,4226	1,6488
4,5	147,20	0,0010875	0,4215	2,373	148,1	655,2	507,1	0,4331	1,6394
5,0	151,11	0,0010918	0,3817	2,620	152,1	656,3	504,2	0,4426	1,6309
6	158,08	0,0010998	0,3214	3,111	159,3	658,3	498,9	0,4594	1,6164
7	164,17	0,0011071	0,2778	3,600	165,7	659,9	494,2	0,4738	1,6039
8	169,61	0,0011139	0,2448	4,085	171,4	661,2	489,8	0,4868	1,5931
9	174,53	0,0011202	0,2189	4,568	176,5	662,3	485,8	0,4983	1,5834
10	179,04	0,0011262	0,1980	5,051	181,3	663,3	482,1	0,5088	1,5748
11	183,20	0,0011319	0,1808	5,531	185,7	664,1	478,4	0,5184	1,5670
12	187,08	0,0011373	0,1663	6,013	189,8	664,9	475,1	0,5273	1,5597
13	190,71	0,0011426	0,1540	6,494	193,6	665,6	472,0	0,5356	1,5530
14	194,13	0,0011476	0,1434	6,974	197,3	666,2	468,9	0,5434	1,5468
15	197,36	0,0011525	0,1342	7,452	200,7	666,7	465,9	0,5507	1,5410
16	200,43	0,0011572	0,1261	7,930	204,0	667,1	463,1	0,5577	1,5354
17	203,35	0,0011618	0,1189	8,410	207,2	667,5	460,3	0,5642	1,5302
18	206,14	0,0011662	0,1125	8,889	210,2	667,8	457,6	0,5705	1,5253
19	208,81	0,0011706	0,1067	9,372	213,1	668,2	455,1	0,5764	1,5206

Продолжение табл. 11

p в кГ/см²	t в °С	v' в м³/кГ	v'' в м³/кГ	γ'' в кГ/м³	i' в ккал/кГ	i'' в ккал/кГ	r в ккал/кГ	s' в ккал/кГ °К	s'' в ккал/кГ °К
20	211,38	0,0011749	0,1015	9,852	215,9	668,5	452,6	0,5822	1,5161
21	213,85	0,0011792	0,09676	10,34	218,6	668,7	450,1	0,5877	1,5118
22	216,23	0,0011833	0,09245	10,82	221,2	668,9	447,7	0,5930	1,5077
23	218,53	0,0011874	0,08849	11,30	223,8	669,0	445,2	0,5981	1,5037
24	220,75	0,0011914	0,08486	11,78	226,2	669,2	443,0	0,6031	1,4998
25	222,90	0,0011953	0,08150	12,27	228,6	669,3	440,7	0,6074	1,4961
26	224,99	0,0011992	0,07838	12,76	230,9	669,4	438,5	0,6124	1,4925
27	227,01	0,0012030	0,07551	13,24	233,2	669,4	436,2	0,6168	1,4891
28	228,98	0,0012067	0,07282	13,73	235,4	669,5	434,1	0,6212	1,4857
29	230,89	0,0012105	0,07032	14,22	237,5	669,5	432,0	0,6254	1,4825
30	232,76	0,0012142	0,06797	14,93	239,6	669,6	430,0	0,6295	1,4794
32	236,35	0,0012215	0,06370	15,70	243,7	669,6	425,9	0,6374	1,4733
34	239,77	0,0012286	0,05995	16,68	247,6	669,5	421,9	0,6449	1,4675
36	243,04	0,0012356	0,05654	17,69	251,3	669,4	418,1	0,6520	1,4620
38	246,17	0,0012425	0,05352	18,68	254,9	669,2	414,3	0,6589	1,4567
40	249,18	0,0012493	0,05077	19,70	258,4	669,0	410,6	0,6654	1,4517
42	252,07	0,0012561	0,04829	20,71	261,8	668,8	407,0	0,6718	1,4468
44	254,87	0,0012628	0,04601	21,73	265,0	668,5	403,5	0,6779	1,4420
46	257,56	0,0012694	0,04394	22,76	268,2	668,2	400,0	0,6838	1,4375
48	260,17	0,0012759	0,04203	23,79	271,3	667,9	396,6	0,6895	1,4331
50	262,70	0,0012825	0,04026	24,84	274,3	667,5	393,2	0,6950	1,4288
55	268,69	0,0012986	0,03639	27,48	281,5	666,6	385,1	0,7080	1,4186
60	274,29	0,0013147	0,03313	30,18	288,3	665,4	377,1	0,7203	1,4089
65	279,54	0,0013305	0,03036	32,94	294,8	664,0	369,2	0,7318	1,3998
70	284,48	0,0013466	0,02798	35,74	301,0	662,6	361,6	0,7428	1,3911
75	289,17	0,0013626	0,02589	38,63	307,0	661,0	354,0	0,7532	1,3827
80	293,62	0,0013787	0,02405	41,58	312,8	659,3	346,5	0,7631	1,3745
85	297,86	0,0013950	0,02243	44,58	318,4	657,6	339,2	0,7726	1,3666
90	301,92	0,0014115	0,02095	47,71	323,8	655,7	331,9	0,7818	1,3587
95	305,80	0,0014282	0,01965	50,89	329,1	653,8	324,7	0,7906	1,3514
100	309,53	0,0014453	0,01845	54,17	334,2	651,7	317,5	0,7992	1,3440
110	316,58	0,001480	0,01638	61,05	344,2	647,2	303,0	0,8158	1,3294
120	323,15	0,001517	0,01463	68,35	353,9	642,5	288,6	0,8315	1,3151
130	329,30	0,001557	0,01313	76,16	363,4	637,2	273,8	0,8467	1,3012
140	335,09	0,00160	0,01182	84,60	372,7	631,7	259,0	0,8614	1,2873
150	340,56	0,001644	0,01066	93,81	381,9	625,6	243,7	0,8758	1,2728
160	345,74	0,001693	0,009625	103,9	391,1	618,9	227,8	0,8901	1,2580
170	350,66	0,001748	0,008681	115,2	400,4	611,5	211,1	0,9045	1,2422
180	355,35	0,001812	0,007803	128,2	410,1	602,8	192,7	0,9192	1,2257
190	359,82	0,001890	0,00697	143,5	420,4	593,0	172,6	0,9347	1,2074
200	364,08	0,001987	0,00618	161,9	431,3	581,4	150,1	0,9514	1,1848
210	368,16	0,00213	0,00535	186,9	444,5	565,9	121,4	0,9713	1,1606
220	372,1	0,00238	0,00436	229	463	542,3	79,3	0,9993	1,1214
224	373,6	0,00267	0,00378	268	479	524,7	45,7	1,0240	1,0880

Истинные теплоёмкости водяного перегретого

p $\frac{кГ}{см^2}$ \ $t°$ C	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
1	0,489	0,482	0,477	0,474	0,472	0,473	0,474	0,475	0,477	0,479	0,481	0,484	0,487	0,489	0,492
5	—	—	—	0,534	0,521	0,511	0,503	0,498	0,496	0,495	0,495	0,496	0,497	0,498	0,500
10	—	—	—	—	0,597	0,564	0,544	0,531	0,523	0,518	0,514	0,512	0,511	0,510	0,510
20	—	—	—	—	—	—	0,703	0,637	0,596	0,569	0,556	0,547	0,540	0,535	0,532
30	—	—	—	—	—	—	—	0,817	0,704	0,643	0,610	0,587	0,572	0,562	0,555
40	—	—	—	—	—	—	—	—	0,868	0,747	0,680	0,638	0,609	0,592	0,580
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,897	0,770	0,701	0,653	0,626	0,607
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,104	0,888	0,776	0,706	0,664	0,637
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,053	0,866	0,769	0,709	0,671
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,310	0,985	0,846	0,761	0,709
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,149	0,941	0,822	0,753
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,376	1,059	0,894	0,803
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,695	1,207	0,979	0,859
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,400	1,080	0,921
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,671	1,201	0,990
140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,091	1,350	1,069
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,551	1,164
160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,850	1,282
170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,335	1,431
180	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,623
190	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,876
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,255
210	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,83
220	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
230	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
240	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
270	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
290	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 12

пара при постоянном давлении c_p в $\frac{ккал}{кГ \cdot град}$ [2]

400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
0,495	0,498	0,501	0,504	0,507	0,510	0,513	0,517	0,520	0,523	0,526	0,529	0,532	0,536	0,539	0,542
0,502	0,504	0,506	0,509	0,512	0,514	0,517	0,520	0,523	0,526	0,529	0,532	0,535	0,539	0,542	0,545
0,511	0,512	0,513	0,515	0,517	0,519	0,522	0,524	0,527	0,529	0,532	0,535	0,538	0,541	0,544	0,547
0,529	0,528	0,527	0,528	0,528	0,529	0,530	0,532	0,534	0,536	0,538	0,540	0,543	0,546	0,549	0,552
0,549	0,545	0,543	0,541	0,539	0,539	0,539	0,540	0,541	0,542	0,544	0,546	0,549	0,551	0,554	0,557
0,570	0,563	0,558	0,554	0,551	0,550	0,549	0,548	0,549	0,549	0,550	0,552	0,554	0,556	0,559	0,562
0,593	0,582	0,574	0,568	0,564	0,561	0,559	0,557	0,556	0,556	0,556	0,558	0,559	0,561	0,564	0,566
0,618	0,603	0,591	0,583	0,577	0,572	0,569	0,566	0,564	0,563	0,562	0,564	0,565	0,567	0,569	0,571
0,645	0,625	0,609	0,599	0,590	0,583	0,579	0,575	0,572	0,570	0,568	0,570	0,571	0,572	0,573	0,575
0,675	0,648	0,629	0,615	0,604	0,595	0,589	0,584	0,580	0,577	0,575	0,576	0,576	0,577	0,578	0,580
0,708	0,673	0,650	0,632	0,618	0,607	0,600	0,593	0,588	0,584	0,581	0,582	0,582	0,583	0,584	0,585
0,744	0,701	0,672	0,650	0,634	0,621	0,611	0,603	0,596	0,591	0,588	0,588	0,588	0,588	0,589	0,590
0,783	0,730	0,696	0,670	0,650	0,634	0,622	0,613	0,605	0,599	0,595	0,595	0,594	0,594	0,595	0,595
0,826	0,762	0,721	0,690	0,666	0,648	0,634	0,623	0,614	0,607	0,602	0,601	0,600	0,600	0,601	0,601
0,873	0,798	0,747	0,711	0,684	0,663	0,647	0,634	0,623	0,615	0,610	0,608	0,607	0,606	0,607	0,606
0,925	0,836	0,774	0,733	0,702	0,678	0,659	0,645	0,633	0,624	0,617	0,615	0,614	0,612	0,612	0,611
0,983	0,876	0,802	0,757	0,721	0,694	0,673	0,656	0,643	0,632	0,624	0,622	0,620	0,618	0,618	0,617
1,049	0,919	0,832	0,783	0,741	0,710	0,686	0,668	0,653	0,641	0,632	0,629	0,626	0,624	0,624	0,623
1,126	0,965	0,866	0,811	0,762	0,727	0,700	0,680	0,663	0,649	0,640	0,636	0,633	0,631	0,630	0,629
1,217	1,020	0,904	0,840	0,784	0,745	0,716	0,692	0,674	0,658	0,648	0,644	0,640	0,639	0,636	0,634
1,330	1,083	0,946	0,871	0,808	0,764	0,731	0,705	0,685	0,667	0,656	0,652	0,648	0,645	0,642	0,640
1,469	1,154	0,993	0,904	0,833	0,783	0,746	0,718	0,696	0,676	0,664	0,659	0,655	0,652	0,649	0,647
1,636	1,235	1,045	0,939	0,859	0,804	0,763	0,731	0,707	0,686	0,673	0,667	0,663	0,659	0,656	0,653
1,832	1,327	1,102	0,977	0,887	0,825	0,780	0,745	0,718	0,69	0,681	0,675	0,670	0,666	0,663	0,660
2,057	1,431	1,164	1,017	0,916	0,847	0,797	0,759	0,730	0,705	0,689	0,683	0,678	0,673	0,670	0,666
2,320	1,548	1,231	1,060	0,946	0,870	0,815	0,774	0,742	0,715	0,698	0,691	0,686	0,681	0,677	0,673
2,66	1,679	1,303	1,105	0,977	0,893	0,834	0,789	0,755	0,726	0,707	0,700	0,694	0,688	0,684	0,680
—	1,825	1,380	1,153	1,010	0,916	0,853	0,804	0,767	0,737	0,716	0,708	0,702	0,696	0,691	0,687
—	1,990	1,462	1,204	1,045	0,941	0,873	0,819	0,780	0,748	0,725	0,717	0,711	0,704	0,699	0,694
—	2,178	1,549	1,256	1,081	0,966	0,893	0,835	0,794	0,759	0,734	0,725	0,719	0,712	0,707	0,702
—	2,40	1,646	1,308	1,117	0,992	0,913	0,851	0,807	0,770	0,743	0,734	0,727	0,720	0,714	0,709
—	2,67	1,764	1,359	1,153	1,018	0,934	0,869	0,821	0,781	0,753	0,743	0,736	0,729	0,722	0,716

Средняя теплоемкость перегретого водяного пара,

p $\frac{кГ}{см^2}$ \ $t°$ C	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
1	0,488	0,479	0,476	0,475	0,474	0,473	0,473	0,474	0,475	0,475	0,476	0,476	0,477	0,478	0,479
5	—	—	0,562	0,533	0,520	0,514	0,511	0,509	0,508	0,507	0,506	0,504	0,504	0,504	0,503
10	—	—	—	—	0,577	0,566	0,556	0,548	0,544	0,540	0,536	0,533	0,530	0,528	0,527
20	—	—	—	—	—	0,681	0,653	0,626	0,313	0,603	0,594	0,586	0,579	0,573	0,568
30	—	—	—	—	—	—	0,746	0,709	0,687	0,669	0,653	0,640	0,629	0,620	0,612
40	—	—	—	—	—	—	—	0,832	0,779	0,749	0,723	0,700	0,681	0,667	0,655
50	—	—	—	—	—	—	—	—	0,879	0,828	0,788	0,761	0,738	0,717	0,700
60	—	—	—	—	—	—	—	—	0,981	0,919	0,873	0,838	0,799	0,771	0,747
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,039	0,972	0,915	0,866	0,829	0,798
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,207	1,090	1,008	0,943	0,893	0,855
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,217	1,115	1,027	0,964	0,915
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,366	1,236	1,127	1,044	0,982
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,550	1,384	1,235	1,136	1,059
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,585	1,360	1,235	1,140
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,869	1,521	1,355	1,236
140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,261	1,718	1,492	1,336
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,975	1,654	1,462
160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,307	1,850	1,604
170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,816	2,113	1,777
180	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,462	1,991
190	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,965	2,264
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,704	2,629
210	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,176
220	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,111

Таблица 13

отсчитанная от температуры насыщения c_{pm} в $\frac{ккал}{кГ \cdot град}$ [2]

420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
0,481	0,482	0,483	0,484	0,485	0,487	0,488	0,489	0,491	0,492	0,493	0,495	0,496	0,498	0,499
0,503	0,504	0,504	0,504	0,505	0,505	0,506	0,507	0,508	0,508	0,510	0,511	0,512	0,513	0,514
0,525	0,524	0,524	0,523	0,523	0,523	0,523	0,523	0,523	0,524	0,524	0,525	0,525	0,526	0,527
0,564	0,561	0,559	0,557	0,555	0,553	0,552	0,551	0,550	0,549	0,549	0,548	0,548	0,548	0,548
0,605	0,599	0,594	0,589	0,586	0,583	0,580	0,577	0,575	0,573	0,572	0,571	0,570	0,569	0,568
0,645	0,636	0,629	0,622	0,616	0,611	0,607	0,603	0,600	0,597	0,594	0,592	0,590	0,589	0,587
0,686	0,673	0,663	0,654	0,646	0,640	0,634	0,629	0,624	0,620	0,616	0,613	0,610	0,608	0,606
0,728	0,712	0,699	0,687	0,677	0,669	0,661	0,654	0,648	0,643	0,638	0,634	0,630	0,627	0,624
0,773	0,754	0,737	0,722	0,710	0,699	0,690	0,681	0,673	0,667	0,661	0,656	0,651	0,647	0,643
0,824	0,798	0,777	0,760	0,744	0,731	0,719	0,708	0,699	0,691	0,684	0,678	0,672	0,667	0,662
0,876	0,845	0,820	0,798	0,779	0,763	0,749	0,737	0,726	0,716	0,708	0,700	0,693	0,687	0,682
0,934	0,896	0,865	0,839	0,817	0,798	0,781	0,766	0,754	0,743	0,733	0,724	0,716	0,708	0,702
0,999	0,952	0,915	0,884	0,857	0,835	0,816	0,799	0,784	0,771	0,759	0,748	0,739	0,731	0,723
1,068	1,012	0,967	0,930	0,899	0,873	0,851	0,831	0,814	0,799	0,785	0,773	0,763	0,753	0,745
1,147	1,079	1,025	0,981	0,946	0,915	0,889	0,866	0,847	0,829	0,814	0,800	0,788	0,777	0,767
1,232	1,151	1,086	1,035	0,994	0,959	0,929	0,903	0,881	0,861	0,843	0,828	0,815	0,802	0,791
1,330	1,232	1,155	1,095	1,047	1,007	0,972	0,943	0,918	0,895	0,875	0,858	0,842	0,828	0,816
1,440	1,322	1,232	1,162	1,106	1,059	1,019	0,986	0,957	0,932	0,910	0,890	0,873	0,857	0,843
1,571	1,427	1,319	1,237	1,171	1,118	1,072	1,034	1,001	0,972	0,947	0,925	0,905	0,888	0,872
1,729	1,551	1,421	1,323	1,247	1,184	1,132	1,088	1,050	1,018	0,990	0,965	0,943	0,923	0,905
1,905	1,699	1,541	1,424	1,333	1,260	1,200	1,149	1,106	1,069	1,037	1,009	0,984	0,962	0,942
2,161	1,880	1,687	1,546	1,437	1,350	1,280	1,221	1,172	1,129	1,093	1,062	1,034	1,008	0,984
2,502	2,129	1,882	1,707	1,573	1,470	1,385	1,315	1,257	1,207	1,164	1,127	1,094	1,065	1,038
3,058	2,521	2,183	1,951	1,780	1,648	1,542	1,455	1,383	1,322	1,270	1,225	1,185	1,150	1,118

Удельный объем в $м^3/кГ$, энтальпия в $ккал/кГ$
(для воды — числа под ступенчатой линией

Давление p в $кГ/см^2$		Темпера							
		40	60	80	100	120	140	160	180
0,05	v	29,42	31,31	33,19	35,08	36,96	38,85	40,73	42,62
	i	614,8	623,9	633,0	642,1	651,1	660,2	669,4	678,6
	s	2,0164	2,0439	2,0703	2,0953	2,1190	2,1415	2,1631	2,1839
0,06	v	24,50	26,08	27,65	29,23	30,80	32,37	33,94	35,51
	i	614,8	623,9	632,9	642,1	651,1	660,2	669,4	678,5
	s	1,9965	2,0237	2,0500	2,0751	2,0983	2,1214	2,1430	2,1638
0,08	v	1,0079	19,56	20,74	21,92	23,10	24,28	25,46	26,64
	i	40,0	623,8	632,9	642,1	651,1	660,1	669,3	678,5
	s	0,1365	1,9919	2,0183	2,0432	2,0669	2,0896	2,1112	2,1319
0,10	v	1,0079	15,64	16,58	17,53	18,47	19,42	20,36	21,30
	i	40,0	623,7	632,8	642,0	651,0	660,1	669,3	678,5
	s	0,1365	1,9672	1,9935	2,0186	2,0423	2,0649	2,0865	2,1073
0,12	v	1,0079	13,02	13,81	14,60	15,39	16,18	16,96	17,75
	i	40,0	623,6	632,8	641,9	651,0	660,1	669,3	678,5
	s	0,1365	1,9470	1,9733	1,9984	2,0221	2,0448	2,0664	2,0872
0,16	v	1,0079	9,759	10,358	10,95	11,54	12,13	12,72	13,31
	i	40,0	623,4	632,6	641,8	650,9	660,0	669,2	678,4
	s	0,1365	1,9150	1,9415	1,9666	1,9903	2,0129	2,0347	2,0554
0,20	v	1,0079	7,797	8,277	8,752	9,226	9,699	10,172	10,645
	i	40,0	623,2	632,5	641,7	650,8	659,9	669,1	678,3
	s	0,1365	1,8908	1,9166	1,9417	1,9655	1,9882	2,0098	2,0306
0,24	v	1,0079	1,0171	6,893	7,290	7,685	8,080	8,474	8,869
	i	40,0	60,0	632,3	641,5	650,7	659,9	669,1	678,3
	s	0,1365	0,1984	1,8962	1,9215	1,9454	1,9681	1,9897	2,0105
0,30	v	1,0079	1,0171	5,507	5,826	6,143	6,459	6,776	7,092
	i	40,0	60,0	632,1	641,4	650,6	659,8	669,0	678,2
	s	0,1365	0,1984	1,8713	1,8965	1,9204	1,9431	1,9648	1,9856
0,40	v	1,0079	1,0171	4,123	4,365	4,604	4,842	5,079	5,317
	i	40,0	60,0	631,7	641,1	650,3	659,5	668,8	678,0
	s	0,1365	0,1984	1,8389	1,8646	1,8887	1,9116	1,9334	1,9542
0,50	v	1,0079	1,0171	1,0290	3,487	3,679	3,870	4,060	4,250
	i	40,0	60,0	80,0	640,8	650,1	659,3	668,6	677,9
	s	0,1365	0,1984	0,2567	1,8397	1,8639	1,8866	1,9084	1,9294
0,60	v	1,0079	1,0171	1,0290	2,902	3,063	3,223	3,382	3,540
	i	40,0	60,0	80,0	640,4	649,9	659,2	668,5	677,7
	s	0,1365	0,1984	0,2567	1,8186	1,8432	1,8662	1,8880	1,9089
0,70	v	1,0079	1,0171	1,0290	2,484	2,623	2,760	2,896	3,033
	i	40,0	60,0	80,0	640,2	649,7	659,0	668,3	677,5
	s	0,1365	0,1984	0,2567	1,8012	1,8257	1,8488	1,8706	1,8916
0,80	v	1,0079	1,0171	1,0289	2,169	2,292	2,413	2,532	2,652
	i	40,0	60,0	80,0	639,9	649,4	658,8	668,2	677,5
	s	0,1365	0,1984	0,2567	1,7859	1,8107	1,8339	1,8559	1,8769
0,90	v	1,0079	1,0171	1,0289	1,925	2,035	2,143	2,249	2,356
	i	40,0	60,0	80,0	639,5	649,2	658,6	668,0	677,3
	s	0,1365	0,1984	0,2567	1,7722	1,7973	1,8203	1,8426	1,8637

Таблица 14

и энтропия в *ккал/кг* °К для воды и перегретого водяного пара — удельный объем выражен в *дм³/кГ*)

тура в °С

200	220	240	260	280	300	320	340	360
44,50 687,8 2,2039	46,39 697,0 2,2231	48,27 706,4 2,2415	50,15 715,8 2,2595	52,04 725,2 2,2769	53,92 734,8 2,2938	55,80 744,4 2,3102	57,69 754,0 2,3261	59,57 763,8 2,3418
37,08 687,8 2,1838	38,65 697,0 2,2030	40,22 706,4 2,2214	41,79 715,8 2,2393	43,36 725,2 2,2568	44,93 734,8 2,2737	46,50 744,4 2,2900	48,07 754,0 2,3059	49,64 763,8 2,3216
27,82 687,8 2,1518	28,99 697,0 2,1711	30,17 706,3 2,1897	31,35 715,7 2,2076	32,52 725,2 2,2249	33,70 734,8 2,2418	34,88 744,4 2,2582	36,05 754,0 2,2742	37,23 763,8 2,2898
22,24 687,7 2,1273	23,19 697,0 2,1465	24,13 706,3 2,1650	25,07 715,7 2,1830	26,02 725,1 2,2003	26,96 734,8 2,2172	27,90 744,4 2,2337	28,84 754,0 2,2497	29,78 763,8 2,2652
18,54 687,7 2,1072	19,32 697,0 2,1264	20,11 706,3 2,1450	20,89 715,7 2,1630	21,68 725,1 2,1803	22,46 734,8 2,1972	23,25 744,4 2,2135	24,03 754,0 2,2295	24,82 763,8 2,2451
13,899 687,7 2,0753	14,488 696,9 2,0946	15,076 706,2 2,1132	15,664 715,7 2,1310	16,25 725,2 2,1484	16,84 734,48 2,1654	17,43 744,4 2,1819	18,02 754,0 2,1978	18,61 763,8 2,2133
11,118 687,6 2,0506	11,591 696,9 2,0698	12,063 706,2 2,0885	12,535 715,6 2,1065	13,007 725,2 2,1238	13,478 734,8 2,1409	13,949 744,4 2,1573	14,420 754,0 2,1732	14,891 763,8 2,1887
9,262 687,6 2,0305	9,656 696,9 2,0497	10,051 706,2 2,0683	10,445 715,6 2,0863	10,837 725,1 2,1037	11,23 734,7 2,1206	11,623 744,3 2,1371	12,016 754,0 2,1531	12,409 763,8 2,1686
7,407 687,5 2,0058	7,722 696,8 2,0250	8,038 706,1 2,0436	8,352 715,5 2,0616	8,667 725,1 2,0790	8,983 734,3 2,0959	9,298 744,3 2,1124	9,612 754,0 2,1285	9,926 763,8 2,1441
5,553 687,4 1,9742	5,790 696,7 1,9934	6,026 706,1 2,0120	6,263 715,5 2,0300	6,500 725,1 2,0475	6,736 734,7 2,0644	6,971 744,3 2,0807	7,207 753,9 2,0968	7,443 763,7 2,1124
4,440 687,2 1,9494	4,629 696,6 1,9686	4,819 705,9 1,9873	5,008 715,4 2,0053	5,197 725,0 2,0228	5,387 734,6 2,0397	5,577 744,2 2,0560	5,767 753,9 2,0721	5,955 763,7 2,0876
3,700 687,1 1,9289	3,858 696,5 1,9483	4,016 705,9 1,9669	4,174 715,3 1,9849	4,331 724,9 2,0023	4,489 734,5 2,0193	4,646 744,1 2,0359	4,804 753,8 2,0519	4,961 763,6 2,0675
3,169 687,0 1,9118	3,304 696,4 1,9311	3,440 705,8 1,9499	3,576 715,3 1,9679	3,711 724,9 1,9853	3,847 734,5 2,0024	3,982 744,1 2,0189	4,117 753,8 2,0349	4,252 763,6 2,0504
2,771 686,9 1,8971	2,890 696,3 1,9165	3,009 705,7 1,9351	3,127 715,2 1,9531	3,246 724,8 1,9706	3,364 734,4 1,9876	3,482 744,0 2,0039	3,601 753,7 2,0199	3,720 763,5 2,0356
2,462 686,7 1,8839	2,568 696,1 1,9033	2,673 705,6 1,9220	2,779 715,1 1,9400	2,884 724,7 1,9575	2,989 734,3 1,9745	3,095 743,9 1,9908	3,200 753,6 2,0069	3,305 763,4 2,0226

Давление p в кГ/см²		Температура							
		380	400	420	440	460	480	500	520
0,05	v	61,46	63,33	65,21	67,09	68,98	70,86	72,74	74,62
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,3569	2,3717	2,3863	2,4006	2,4146	2,4283	2,4417	2,4550
0,06	v	51,20	52,78	54,35	55,92	57,48	59,05	60,62	62,18
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,3368	2,3516	2,3662	2,3805	2,3945	2,4082	2,4217	2,4349
0,08	v	38,41	39,59	40,76	41,94	43,12	44,30	45,47	46,65
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,3049	2,3198	2,3343	2,3486	2,3626	2,3764	2,3899	2,4031
0,10	v	30,72	31,67	32,61	33,55	34,49	35,43	36,38	37,32
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,2804	2,2953	2,3098	2,3240	2,3381	2,3519	2,3654	2,3786
0,12	v	25,60	26,39	27,17	27,95	28,74	29,52	30,31	31,10
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,2603	2,2752	2,2897	2,3040	2,3181	2,3318	2,3453	2,3585
0,16	v	19,20	19,79	20,37	20,96	21,54	22,13	22,72	23,31
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,2286	2,2435	2,2580	2,2722	2,2863	2,3001	2,3137	2,3271
0,20	v	15,362	15,833	16,30	16,77	17,23	17,70	18,17	18,64
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,2040	2,2189	2,2334	2,2476	2,2617	2,2755	2,2891	2,3025
0,24	v	12,802	13,194	13,587	13,979	14,371	14,763	15,156	15,548
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,1839	2,1988	2,2133	2,2275	2,2416	2,2554	2,2690	2,2824
0,30	v	10,240	10,554	10,868	11,182	11,496	11,810	12,124	12,438
	i	773,6	783,4	793,3	803,3	813,3	823,4	833,6	843,8
	s	2,1592	2,1741	2,1887	2,2030	2,2171	2,2309	2,2445	2,2579
0,40	v	7,679	7,916	8,151	8,387	8,623	8,858	9,093	9,329
	i	773,5	783,3	793,2	803,2	813,2	823,4	833,6	843,8
	s	2,1276	2,1425	2,1571	2,1714	2,1855	2,1993	2,2128	2,2261
0,50	v	6,144	6,333	6,521	6,710	6,898	7,087	7,275	7,464
	i	773,5	783,3	793,2	803,2	813,2	823,3	833,5	843,7
	s	2,1029	2,1177	2,1323	2,1467	2,1607	2,1745	2,1880	2,2014
0,60	v	5,118	5,277	5,434	5,591	5,750	5,906	6,063	6,220
	i	773,4	783,3	793,2	803,2	813,2	823,3	833,5	843,7
	s	2,0827	2,0976	2,1122	2,1265	2,1405	2,1542	2,1678	2,1811
0,70	v	4,388	4,522	4,657	4,792	4,927	5,061	5,196	5,331
	i	773,4	783,2	793,1	803,1	813,1	823,3	833,5	843,7
	s	2,0657	2,0806	2,0951	2,1094	2,1235	2,1372	2,1508	2,1641
0,80	v	3,838	3,956	4,074	4,191	4,309	4,427	4,545	4,663
	i	773,3	783,2	793,1	803,1	813,1	823,3	833,5	843,7
	s	2,0508	2,0657	2,0803	2,0946	2,1086	2,1224	2,1360	2,1494
0,90	v	3,410	3,515	3,620	3,725	3,830	3,936	4,040	4,145
	i	773,2	783,1	793,1	803,1	813,1	823,2	833,4	843,6
	s	2,0377	2,0526	2,0671	2,0813	2,0954	2,1092	2,1223	2,1362

Продолжение табл. 14

тура в °С								
540	560	580	600	620	640	660	680	700
76,51 854,1 2,4681	78,40 864,5 2,4808	80,28 875,0 2,4934	82,17 885,5 2,5057	84,05 896,0 2,5177	85,93 906,6 2,5294	87,82 917,3 2,5410	89,70 928,1 2,5524	91,58 938,9 2,5637
63,76 854,1 2,4480	65,34 864,5 2,4607	66,90 875,0 2,4733	68,47 885,5 2,4856	70,04 896,0 2,4976	71,61 906,6 2,5093	73,18 917,3 2,5209	74,75 928,1 2,5323	76,32 938,9 2,5436
47,82 854,1 2,4162	49,00 864,5 2,4290	50,18 874,9 2,4416	51,35 885,4 2,4539	52,53 896,0 2,4659	53,71 906,6 2,4776	54,88 917,3 2,4892	56,06 928,1 2,5006	57,24 938,9 2,5119
38,26 854,1 2,3916	39,20 864,5 2,4044	40,14 874,9 2,4170	41,08 885,4 2,4293	42,02 896,0 2,4412	42,96 906,6 2,4530	43,91 917,3 2,4646	44,85 928,1 2,4760	45,79 938,9 2,4873
31,88 854,1 2,3716	32,67 864,5 2,3844	33,45 874,9 2,3969	34,24 885,4 2,4092	35,02 896,0 2,4212	35,81 906,6 2,4330	36,59 917,3 2,4445	37,38 928,1 2,4559	38,16 938,9 2,4672
23,90 854,1 2,3402	24,49 864,5 2,3529	25,09 874,9 2,3653	25,68 885,4 2,3775	26,26 896,0 2,3895	26,86 906,6 2,4013	27,44 917,3 2,4128	28,03 928,1 2,4242	28,62 938,9 2,4355
19,11 854,1 2,3156	19,60 864,5 2,3283	20,07 874,9 2,3407	20,54 885,4 2,3529	21,01 896,0 2,3648	21,48 906,6 2,3766	21,95 917,3 2,3882	22,42 928,1 2,3996	22,89 938,9 2,4109
15,940 854,1 2,2955	16,33 864,5 2,3082	16,72 874,9 2,3206	17,12 885,4 2,3329	17,51 896,0 2,3448	17,90 906,6 2,3566	18,30 917,3 2,3682	18,69 928,1 2,3796	19,08 938,9 2,3908
12,752 854,1 2,2709	13,066 864,5 2,2836	13,380 874,9 2,2960	13,693 885,4 2,3082	14,007 896,0 2,3202	14,321 906,6 2,3320	14,634 917,3 2,3436	14,948 928,0 2,3550	15,262 938,9 2,3662
9,564 854,1 2,2392	9,799 864,5 2,2519	10,034 874,9 2,2643	10,269 885,4 2,2765	10,505 895,9 2,2885	10,740 906,6 2,3002	10,975 917,3 2,3118	11,211 928,0 2,3232	11,446 938,9 2,3345
7,652 854,1 2,2145	7,839 864,5 2,2272	8,027 874,9 2,2397	8,215 885,4 2,2519	8,403 895,9 2,2639	8,592 906,6 2,2756	8,780 917,3 2,2872	8,969 928,0 2,2986	9,157 938,8 2,3099
6,376 854,0 2,1942	6,532 864,4 2,2071	6,689 874,9 2,2196	6,846 885,4 2,2318	7,002 895,9 2,2438	7,160 906,5 2,2555	7,316 917,2 2,2671	7,473 928,0 2,2785	7,630 938,8 2,2899
5,465 854,0 2,1772	5,598 864,4 2,1901	5,733 874,8 2,2026	5,867 885,3 2,2148	6,002 895,9 2,2268	6,136 906,5 2,2386	6,271 917,2 2,2502	6,405 928,0 2,2616	6,540 938,8 2,2728
4,781 854,0 2,1625	4,898 864,4 2,1754	5,016 874,8 2,1879	5,134 885,3 2,2001	5,252 895,9 2,2121	5,369 906,5 2,2238	5,487 917,2 2,2354	5,604 928,0 2,2468	5,722 938,8 2,2581
4,249 854,0 2,1493	4,354 864,4 2,1622	4,458 874,8 2,1748	4,563 885,3 2,1871	4,668 895,8 2,1991	4,772 906,4 2,2108	4,877 917,2 2,2224	4,981 928,0 2,2338	5,086 938,8 2,2451

Давление p в $кГ/см^2$		Температура							
		40	60	80	100	120	140	160	180
1,0	v	1,0079	1,0170	1,0289	1,730	1,830	1,926	2,023	2,119
	i	40,0	60,0	80,0	639,2	649,0	658,4	667,8	677,2
	s	0,1365	0,1984	0,2567	1,7603	1,7851	1,8083	1,8303	1,8515
1,2	v	1,0078	1,0170	1,0289	1,0435	1,521	1,602	1,683	1,763
	i	40,0	60,0	80,0	100,1	648,5	658,0	667,5	676,9
	s	0,1365	0,1984	0,2567	0,3121	1,7640	1,7875	1,8097	1,8310
1,4	v	1,0078	1,0170	1,0289	1,0435	1,300	1,371	1,440	1,509
	i	40,0	60,0	80,0	100,1	648,0	657,7	667,2	676,7
	s	0,1365	0,1984	0,2567	0,3121	1,7461	1,7700	1,7924	1,8136
1,6	v	1,0078	1,0170	1,0289	0,0435	1,135	1,197	1,258	1,319
	i	40,0	60,0	80,0	100,1	647,5	657,3	666,9	676,4
	s	0,1365	0,1984	0,2567	0,3121	1,7306	1,7548	1,7771	1,7984
1,8	v	1,0078	1,0170	1,0289	1,0435	1,006	1,062	1,117	1,171
	i	40,0	60,0	80,0	100,1	647,0	656,9	666,6	676,1
	s	0,1365	0,1984	0,2567	0,3121	1,7166	1,7409	1,7637	1,7862
2,0	v	1,0078	1,0170	1,0289	1,0435	0,9027	0,9545	1,0041	1,0530
	i	40,0	60,0	80,0	100,1	646,5	656,5	666,4	675,9
	s	0,1365	0,1984	0,2567	0,3121	1,7043	1,7284	1,7515	1,7732
2,5	v	1,0078	1,0170	1,0289	1,0434	1,0603	0,7597	0,8003	0,8399
	i	40,0	60,0	80,0	100,1	120,3	655,6	665,5	675,2
	s	0,1365	0,1984	0,2567	0,3121	0,3647	1,7024	1,7258	1,7475
3,0	v	1,0078	1,0170	1,0288	1,0434	1,0602	0,6296	0,6643	0,6975
	i	40,0	60,0	80,0	100,1	120,3	654,5	664,7	674,5
	s	0,1365	0,1983	0,2567	0,3121	0,3647	1,6802	1,7044	1,7263
4,0	v	1,0077	1,0169	1,0288	1,0433	1,0602	1,0798	0,4940	0,5197
	i	40,1	60,0	80,0	100,1	120,3	140,7	663,1	673,2
	s	0,1365	0,1983	0,2566	0,3120	0,3646	0,4150	1,6697	1,6927
5,0	v	1,0077	1,0168	1,0287	1,0433	1,0601	1,0797	0,3917	0,4129
	i	40,1	60,0	80,0	100,1	120,3	140,7	661,3	671,7
	s	0,1365	0,1983	0,2566	0,3120	0,3646	0,4150	1,6420	1,6659
6,0	v	1,0077	1,0168	1,0287	1,0432	1,0601	1,0797	0,3232	0,3416
	i	40,1	60,1	80,1	100,1	120,3	140,7	659,4	670,1
	s	0,1365	0,1983	0,2566	0,3120	0,3646	0,4150	1,6186	1,6431
7,0	v	1,0076	1,0168	1,0286	1,0432	1,0600	1,0796	1,1020	0,2906
	i	40,1	60,1	80,1	100,1	120,3	140,7	161,3	668,8
	s	0,1365	0,1983	0,2566	0,3120	0,3646	0,4150	0,4637	1,6235
8,0	v	1,0076	1,0167	1,0286	1,0431	1,0600	1,0795	1,1020	0,2524
	i	40,2	60,1	80,1	100,2	120,3	140,7	161,3	667,3
	s	0,1365	0,1983	0,2566	0,3119	0,3646	0,4149	0,4636	1,6063
9,0	v	1,0075	1,0167	1,0285	1,0431	1,0599	1,0795	1,1019	0,2226
	i	40,2	60,1	80,1	100,2	120,4	140,7	161,3	665,5
	s	0,1364	0,1983	0,2565	0,3119	0,3645	0,4149	0,4636	1,5905
10	v	1,0075	1,0166	1,0285	1,0430	1,0599	1,0794	1,1018	0,1987
	i	40,2	60,1	80,1	100,2	120,4	140,7	161,3	663,8
	s	0,1364	0,1982	0,2565	0,3119	0,3645	0,4149	0,4635	1,5760

Продолжение табл. 14

тура в °С								
200	220	240	260	280	300	320	340	360
2,214 686,6 1,8717	2,310 696,0 1,8913	2,405 705,5 1,9101	2,500 715,1 1,9284	2,595 724,4 1,9461	2,690 734,3 1,9634	2,784 743,9 1,9800	2,880 753,6 1,9961	2,975 763,4 2,0118
1,843 686,4 1,8514	1,923 695,8 1,8710	2,002 705,3 1,8898	2,082 714,9 1,9079	2,161 724,5 1,9258	2,240 734,2 1,9431	2,320 743,8 1,9598	2,399 753,5 1,9759	2,478 763,3 1,9916
1,578 686,1 1,8340	1,647 695,6 1,8536	1,715 705,1 1,8725	1,783 714,7 1,8909	1,851 724,3 1,9086	1,919 734,0 1,9259	1,987 743,6 1,9426	2,056 753,4 1,9587	2,123 763,2 1,9744
1,379 685,9 1,8188	1,439 695,4 1,8386	1,499 704,9 1,8576	1,559 714,5 1,8759	1,619 724,2 1,8936	1,678 733,9 1,9109	1,738 743,5 1,9276	1,798 753,3 1,9439	1,857 763,1 1,9596
1,225 685,7 1,8056	1,278 695,2 1,8252	1,332 704,8 1,8442	1,385 714,4 1,8626	1,438 724,0 1,8804	1,491 733,8 1,8977	1,545 743,4 1,9145	1,598 753,2 1,9308	1,650 763,0 1,9465
1,1016 685,4 1,7937	1,150 695,0 1,8133	1,1982 704,6 1,8324	1,2462 714,2 1,8509	1,2941 723,9 1,8687	1,3419 733,7 1,8858	1,3896 743,3 1,9027	1,4372 753,1 1,9190	1,4847 762,9 1,9349
0,8790 684,8 1,7683	0,9179 694,4 1,7882	0,9567 704,0 1,8072	0,9953 713,7 1,8256	1,0338 723,5 1,8435	1,0722 733,3 1,8609	1,1105 743,1 1,8778	1,1487 752,9 1,8941	1,1869 762,7 1,9100
0,7304 684,2 1,7471	0,7631 693,9 1,7671	0,7956 703,6 1,7864	0,8281 713,4 1,8048	0,8603 723,2 1,8227	0,8923 733,0 1,8402	0,9243 742,8 1,8572	0,9563 752,6 1,8737	0,9882 762,5 1,8896
0,5448 683,0 1,7139	0,5697 692,9 1,7341	0,5944 702,7 1,7535	0,6190 712,6 1,7723	0,6433 722,5 1,7904	0,6676 732,4 1,8079	0,6917 742,3 1,8248	0,7158 752,2 1,8413	0,7398 762,1 1,8574
0,4334 681,7 1,6875	0,4537 691,7 1,7079	0,4736 701,7 1,7277	0,4935 711,7 1,7467	0,5131 721,8 1,7649	0,5327 731,8 1,7826	0,5521 741,7 1,7996	0,5715 751,6 1,8161	0,5908 761,6 1,8322
0,3591 680,6 1,6655	0,3763 690,7 1,6864	0,3932 700,9 1,7064	0,4099 710,9 1,7254	0,4264 721,1 1,7438	0,4428 731,2 1,7615	0,4591 741,2 1,7786	0,4753 751,1 1,7953	0,4915 761,1 1,8114
0,3059 679,5 1,6467	0,3209 689,7 1,6680	0,3356 699,9 1,6882	0,3501 710,1 1,7075	0,3644 720,3 1,7260	0,3785 730,5 1,7438	0,3926 740,5 1,7609	0,4066 750,6 1,7776	0,4206 760,7 1,7939
0,2662 678,2 1,6300	0,2795 688,7 1,6517	0,2925 699,0 1,6722	0,3054 709,3 1,6916	0,3180 719,6 1,7102	0,3305 729,9 1,7282	0,3429 740,0 1,7455	0,3552 750,2 1,7623	0,3674 760,3 1,7787
0,2353 676,8 1,6147	0,2472 687,5 1,6369	0,2589 698,1 1,6577	0,2704 708,5 1,6776	0,2818 718,9 1,6964	0,2930 729,3 1,7144	0,3040 739,5 1,7318	0,3150 749,7 1,7487	0,3260 759,8 1,7651
0,2103 675,4 1,6008	0,2214 686,5 1,6236	0,2321 697,2 1,6449	0,2426 707,7 1,6650	0,2528 718,2 1,6839	0,2630 728,6 1,7019	0,2731 738,9 1,7194	0,2831 749,1 1,7365	0,2930 759,3 1,7530

Давление p в $кГ/см^2$		Температура							
		380	400	420	440	460	480	500	520
1,0	v	3,068	3,163	3,257	3,352	3,446	3,540	3,635	3,729
	i	773,2	783,1	793,1	803,1	813,1	823,2	833,4	843,6
	s	2,0271	2,0421	2,0568	2,0711	2,0851	2,0988	2,1123	2,1254
1,2	v	2,556	2,635	2,713	2,792	2,871	2,950	3,028	3,107
	i	773,1	783,0	793,0	803,0	813,0	823,2	833,4	843,6
	s	2,0069	2,0218	2,0365	2,0509	2,0649	2,0786	2,0921	2,1053
1,4	v	2,190	2,258	2,325	2,393	2,460	2,528	2,595	2,662
	i	773,0	783,0	793,0	803,0	813,0	823,1	833,3	843,5
	s	1,9898	2,0048	2,0194	2,0337	2,0476	2,0613	2,0747	2,0879
1,6	v	1,916	1,975	2,034	2,093	2,152	2,211	2,270	2,330
	i	773,0	782,9	792,9	802,9	812,9	823,1	833,3	843,5
	s	1,9749	1,9899	2,0046	2,0189	2,0328	2,0464	2,0600	2,0732
1,8	v	1,702	1,755	1,807	1,860	1,913	1,965	2,018	2,071
	i	772,9	782,8	792,8	802,8	812,8	823,0	833,2	843,4
	s	1,9618	1,9768	1,9915	2,0058	2,0198	2,0335	2,0469	2,0601
2,0	v	1,5321	1,5794	1,627	1,674	1,721	1,768	1,815	1,864
	i	772,8	782,7	792,7	802,7	812,8	823,0	833,2	843,4
	s	1,9508	1,9652	1,9799	1,9942	2,0081	2,0218	2,0352	2,0484
2,5	v	1,2249	1,2629	1,3009	1,3389	1,3768	1,4147	1,4526	1,4904
	i	772,6	782,5	792,5	802,5	812,7	822,9	833,1	843,3
	s	1,9253	1,9406	1,9553	1,9696	1,9837	1,9975	2,0109	2,0241
3,0	v	1,0200	1,0518	1,0835	1,1152	1,1468	1,1784	1,2100	1,2415
	i	772,4	782,4	792,4	802,4	812,5	822,7	832,9	843,1
	s	1,9051	1,9202	1,9349	1,9492	1,9633	1,9771	1,9906	2,0039
4,0	v	0,7637	0,7875	0,8114	0,8352	0,8590	0,8828	0,9066	0,9304
	i	772,0	782,0	792,0	802,1	812,3	822,5	832,7	842,9
	s	1,8730	1,8881	1,9029	1,9173	1,9314	1,9452	1,9587	1,9720
5,0	v	0,6101	0,6294	0,6485	0,6676	0,6867	0,7058	0,7248	0,7439
	i	771,6	781,6	791,6	801,8	812,0	822,2	832,4	842,7
	s	1,8479	1,8632	1,8780	1,8924	1,9065	1,9204	1,9339	1,9472
6,0	v	0,5077	0,5237	0,5398	0,5558	0,5717	0,5876	0,6036	0,6194
	i	771,1	781,2	791,3	801,5	811,7	821,9	832,2	842,5
	s	1,8271	1,8424	1,8574	1,8719	1,8860	1,8999	1,9135	1,9268
7,0	v	0,4345	0,4483	0,4621	0,4759	0,4896	0,5033	0,5169	0,5306
	i	770,8	780,9	791,0	801,2	811,4	821,6	831,9	842,3
	s	1,8097	1,8252	1,8402	1,8547	1,8688	1,8827	1,8963	1,9096
8,0	v	0,3796	0,3918	0,4039	0,4159	0,4280	0,4400	0,4519	0,4639
	i	770,4	780,5	790,7	800,9	811,1	821,3	831,7	842,1
	s	1,7946	1,8101	1,8251	1,8396	1,8537	1,8676	1,8812	1,8946
9,0	v	0,3369	0,3477	0,3586	0,3693	0,3800	0,3907	0,4014	0,4121
	i	769,9	780,1	790,3	800,5	810,8	821,1	831,5	841,9
	s	1,7810	1,7965	1,8116	1,8262	1,8405	1,8545	1,8681	1,8815
10,0	v	0,3029	0,3127	0,3224	0,3321	0,3418	0,3515	0,3611	0,3707
	i	769,5	779,7	789,9	800,1	810,4	820,8	831,2	841,6
	s	1,7690	1,7845	1,7996	1,8143	1,8286	1,8426	1,8563	1,8697

Продолжение табл. 14

тура в °С								
540	560	580	600	620	640	660	680	700
3,824 854,0 2,1383	3,918 864,4 2,1509	4,012 874,8 2,1633	4,107 885,3 2,1755	4,201 895,8 2,1875	4,295 906,4 2,1992	4,390 917,2 2,2103	4,484 928,0 2,2222	4,578 938,8 2,2335
3,186 853,9 2,1182	3,265 864,3 2,1307	3,343 874,7 2,1431	3,422 885,3 2,1554	3,500 895,8 2,1673	3,579 906,4 2,1791	3,657 917,1 2,1907	3,736 927,9 2,2021	3,814 938,8 2,2134
2,731 853,9 2,1003	2,798 864,3 2,1135	2,865 874,7 2,1260	2,933 885,2 2,1384	3,000 895,8 2,1503	3,067 906,4 2,1621	3,135 917,1 2,1737	3,202 927,9 2,1851	3,269 938,7 2,1964
2,389 853,8 2,0861	2,448 864,2 2,0987	2,507 874,6 2,1113	2,566 885,2 2,1236	2,625 895,8 2,1356	2,684 906,4 2,1473	2,742 917,1 2,1589	2,801 927,9 2,1703	2,860 938,7 2,1816
2,124 853,8 2,0730	2,176 864,2 2,0857	2,228 874,6 2,0982	2,281 885,1 2,1106	2,333 895,7 2,1226	2,385 906,3 2,1344	2,438 917,0 2,1460	2,490 927,8 2,1574	2,542 938,6 2,1686
1,911 853,7 2,0614	1,953 864,1 2,0741	2,005 874,5 2,0866	2,052 885,1 2,0989	2,099 895,7 2,1109	2,147 906,3 2,1227	2,194 917,0 2,1342	2,242 927,8 2,1456	2,288 938,6 2,1570
1,5282 853,6 2,0370	1,5660 864,0 2,0497	1,604 874,4 2,0621	1,641 885,0 2,0743	1,679 895,6 2,0863	1,717 906,2 2,0981	1,755 917,0 2,1097	1,792 927,7 2,1211	1,830 938,6 2,1324
1,2730 853,5 2,0168	1,3045 863,9 2,0295	1,3360 874,3 2,0419	1,3675 884,9 2,0541	1,3991 895,5 2,0661	1,4305 906,2 2,0779	1,4620 916,9 2,0895	1,4935 927,7 2,1009	1,5250 938,5 2,1122
0,9542 853,3 1,9849	0,9779 863,7 1,9976	1,0016 874,2 2,0100	1,0252 884,8 2,0222	1,0489 895,3 2,0343	1,0725 906,0 2,0461	1,0961 916,8 2,0577	1,1198 927,5 2,0691	1,1434 938,4 2,0804
0,7629 853,1 1,9601	0,7819 863,5 1,9728	0,8009 874,0 1,9853	0,8198 884,6 1,9976	0,8388 895,2 2,0096	0,8577 905,9 2,0214	0,8766 916,6 2,0330	0,8956 927,4 2,0444	0,9145 938,2 2,0558
0,6352 852,9 1,9399	0,6512 863,3 1,9526	0,6671 873,8 1,9650	0,6829 884,4 1,9773	0,6987 895,0 1,9894	0,7145 905,7 2,0012	0,7302 916,5 2,0128	0,7460 927,3 2,0242	0,7618 938,1 2,0356
0,5442 852,7 1,9227	0,5579 853,1 1,9354	0,5715 873,6 1,9478	0,5851 884,2 1,9602	0,5986 894,8 1,9723	0,6122 905,5 1,9841	0,6257 916,3 1,9957	0,6393 927,1 2,0071	0,6528 938,0 2,0185
0,4759 852,5 1,9077	0,4879 862,9 1,9204	0,4998 873,5 1,9329	0,5117 884,1 1,9453	0,5236 894,7 1,9574	0,5354 905,4 1,9692	0,5473 916,2 1,9809	0,5591 927,0 1,9923	0,5710 937,9 2,0037
0,4227 852,3 1,8946	0,4334 862,7 1,9073	0,4441 873,3 1,9198	0,4546 883,9 1,9322	0,4652 894,6 1,9443	0,4758 905,3 1,9561	0,4863 916,0 1,9678	0,4969 926,8 1,9793	0,5074 937,7 1,9906
0,3803 852,0 1,8828	0,3899 862,5 1,8956	0,3994 873,1 1,9081	0,4090 883,7 1,9204	0,4185 894,4 1,9325	0,4281 905,1 1,9444	0,4376 915,9 1,9560	0,4471 926,7 1,9675	0,4566 937,6 1,9789

Давление p в кГ/см²		Температура							
		40	60	80	100	120	140	160	180
12	v	1,0074	1,0165	1,0284	1,0429	1,0598	1,0793	1,1017	1,1273
	i	40,2	60,2	80,2	100,2	120,4	140,8	161,3	182,3
	s	0,1364	0,1982	0,2565	0,3119	0,3645	0,4148	0,4635	0,5106
14	v	1,0073	1,0164	1,0283	1,0428	1,0596	1,0792	1,1015	1,1272
	i	40,3	60,2	80,2	100,3	120,4	140,8	161,4	182,3
	s	0,1364	0,1982	0,2564	0,3118	0,3644	0,4148	0,4634	0,5105
16	v	1,0072	1,0163	1,0882	1,0427	1,0595	1,0791	1,1014	1,1270
	i	40,3	60,2	80,2	100,3	120,5	140,8	161,4	182,3
	s	0,1364	0,1982	0,2564	0,3118	0,3644	0,4147	0,4633	0,5104
18	v	1,0071	1,0162	1,0281	1,0425	1,0594	1,0789	1,1013	1,1268
	i	40,4	60,3	80,3	100,3	120,5	140,9	161,4	182,3
	s	0,1364	0,1982	0,2564	0,3117	0,3644	0,4147	0,4633	0,5103
20	v	1,0070	1,0161	1,0280	1,0425	1,0593	1,0788	1,1011	1,1267
	i	40,4	60,3	80,3	100,4	120,5	140,9	161,4	182,3
	s	0,1264	0,1981	0,2563	0,3117	0,3643	0,4146	0,4632	0,5102
25	v	1,0068	1,0159	1,0278	1,0422	1,0591	1,0785	1,1008	1,1263
	i	40,5	60,4	80,4	100,5	120,6	141,0	161,5	182,3
	s	0,1363	0,1980	0,2562	0,3116	0,3642	0,4145	0,4630	0,5100
30	v	1,0066	1,0157	1,0275	1,0419	1,0588	1,0782	1,1004	1,1259
	i	40,6	60,5	80,5	100,5	120,7	141,1	161,6	182,4
	s	0,1362	0,1980	0,2561	0,3115	0,3641	0,4144	0,4629	0,5098
35	v	1,0064	1,0155	1,0273	1,0417	1,0585	1,0779	1,1001	1,1255
	i	40,7	60,6	80,6	100,6	120,8	141,1	161,6	182,5
	s	0,1362	0,1979	0,2561	0,3114	0,3640	0,4143	0,4627	0,5096
40	v	1,0062	1,0152	1,0271	1,0414	1,0582	1,0776	1,0997	1,1251
	i	40,8	60,7	80,7	100,7	120,9	141,2	161,7	182,5
	s	0,1362	0,1978	0,2560	0,3113	0,3639	0,4142	0,4625	0,5094
45	v	1,0060	1,0150	1,0269	1,0412	1,0580	1,0773	1,0994	1,1247
	i	40,9	60,8	80,8	100,8	121,0	141,3	161,8	182,6
	s	0,1361	0,1978	0,2559	0,3112	0,3638	0,4141	0,4624	0,5092
50	v	1,0057	1,0148	1,0266	1,0409	1,0577	1,0770	1,0990	1,1243
	i	41,0	60,9	80,9	100,9	121,1	141,4	161,8	182,6
	s	0,1361	0,1977	0,2558	0,3111	0,3637	0,4140	0,4622	0,5090
60	v	1,0053	1,0144	1,0262	1,0404	1,0572	1,0764	1,0984	1,1235
	i	41,2	61,1	81,1	101,1	121,2	141,5	162,0	182,8
	s	0,1360	0,1976	0,2556	0,3109	0,3635	0,4137	0,4619	0,5086
70	v	1,0049	1,0139	1,0257	1,0399	1,0566	1,0758	1,0977	1,1226
	i	41,4	61,3	81,2	101,2	121,4	141,7	162,1	182,9
	s	0,1359	0,1974	0,2555	0,3107	0,3633	0,4135	0,4617	0,5082
80	v	1,0045	1,0135	1,0252	1,0394	1,0561	1,0752	1,0970	1,1219
	i	41,6	61,5	81,4	101,4	121,6	141,8	162,2	183,0
	s	0,1359	0,1973	0,2553	0,3105	0,3631	0,4133	0,4614	0,5079

Продолжение табл. 14

тура в °С								
200	220	240	260	280	300	320	340	360
0,1728 672,9 1,5762	0,1825 684,5 1,6000	0,1918 695,4 1,6220	0,2006 706,0 1,6425	0,2094 716,7 1,6617	0,2181 727,3 1,6801	0,2265 737,7 1,6978	0,2350 748,1 1,7150	0,2433 758,3 1,7317
0,1460 670,0 1,5545	0,1547 682,3 1,5796	0,1628 693,5 1,6020	0,1707 704,4 1,6229	0,1784 715,2 1,6426	0,1859 725,9 1,6612	0,1933 736,5 1,6792	0,2007 747,0 1,6967	0,2079 757,4 1,7136
1,1565 203,6 0,5562	0,1338 679,8 1,5610	0,1411 691,4 1,5843	0,1482 702,6 1,6056	0,1550 713,7 1,6257	0,1618 724,7 1,6447	0,1684 735,4 1,6630	0,1749 746,0 1,6807	0,1813 756,5 1,6978
1,1563 203,6 0,5561	0,1175 677,0 1,5438	0,1242 689,3 1,5681	0,1307 700,8 1,5901	0,1369 712,1 1,6105	0,1430 723,3 1,6299	0,1490 734,2 1,6484	0,1548 744,9 1,6663	0,1606 755,5 1,6836
1,1561 203,6 0,5560	0,1043 674,4 1,5280	0,1103 687,2 1,5530	0,1167 699,0 1,5757	0,1224 710,6 1,5967	0,1280 722,0 1,6166	0,1334 733,1 1,6355	0,1388 743,9 1,6535	0,1440 754,6 1,6708
1,1556 203,6 0,5558	1,1899 225,4 0,6009	0,03643 681,4 1,5200	0,09158 694,2 1,5443	0,09640 706,5 1,5665	0,10098 718,5 1,5873	0,10546 730,1 1,6069	0,10986 741,2 1,6254	0,11417 752,2 1,6432
1,1552 203,6 0,5556	1,1892 225,4 0,6006	0,06987 675,0 1,4900	0,07459 688,9 1,5167	0,07889 702,1 1,5405	0,08293 714,9 1,5624	0,08680 727,0 1,5827	0,09058 738,4 1,6019	0,09426 749,6 1,6202
1,1547 203,7 0,5553	1,1886 225,4 0,6004	1,2290 247,8 0,6448	0,06234 683,8 1,4919	0,06630 697,8 1,5173	0,06998 711,1 1,5403	0,07346 723,6 1,5615	0,07680 735,6 1,5812	0,08004 747,1 1,6000
1,1542 203,7 0,5551	1,1880 225,4 0,6001	1,2282 247,8 0,6445	0,05302 678,0 1,4684	0,05679 693,0 1,4957	0,06022 706,9 1,5202	0,06339 720,2 1,5424	0,06642 732,6 1,5631	0,06935 744,5 1,5824
1,1537 203,8 0,5549	1,1874 225,4 0,5999	1,2274 247,8 0,6442	0,04567 671,6 1,4458	0,04935 687,9 1,4757	0,05260 702,5 1,5018	0,05556 716,3 1,5250	0,05835 729,5 1,5462	0,06103 742,0 1,5661
1,1532 203,8 0,5547	1,1863 225,5 0,5996	1,2266 247,8 0,6439	1,2751 271,1 0,6885	0,04330 682,7 1,4564	0,04646 698,4 1,4843	0,04927 712,9 1,5087	0,05187 726,5 1,5307	0,05436 739,4 1,5511
1,1522 203,9 0,5543	1,1857 225,5 0,5991	1,2251 247,8 0,6133	1,2729 270,9 0,6878	0,03405 671,0 1,4188	0,03711 689,0 1,4513	0,03976 705,2 1,4739	0,04212 720,1 1,5030	0,04432 733,9 1,5246
1,1513 204,0 0,5539	1,1845 225,6 0,5986	1,2236 247,8 0,6428	1,2709 270,9 0,6871	1,3308 295,2 0,7317	0,03029 678,7 1,4195	0,03287 697,1 1,4510	0,03511 713,3 1,4773	0,03714 728,0 1,5007
1,1504 204,1 0,5535	1,1833 225,7 0,5982	1,2221 247,8 0,6423	1,2689 270,9 0,6864	1,3279 295,1 0,7303	0,02503 667,0 1,3875	0,02759 688,1 1,4239	0,02977 706,1 1,4535	0,03170 721,9 1,4789

Давление p в кГ/см²		Температура							
		380	400	420	440	460	480	500	520
12,0	v	0,2516	0,2599	0,2680	0,2762	0,2843	0,2925	0,3005	0,3086
	i	768,6	778,9	789,1	799,5	809,9	820,3	830,7	841,1
	s	1,7478	1,7635	1,7787	1,7935	1,8080	1,8221	1,8358	1,8492
14,0	v	0,2150	0,2222	0,2292	0,2363	0,2433	0,2502	0,2572	0,2641
	i	767,8	778,2	788,5	798,9	809,3	819,7	830,2	840,6
	s	1,7300	1,7458	1,7611	1,7760	1,7905	1,8046	1,8184	1,8319
16,0	v	0,1876	0,1939	0,2001	0,2063	0,2125	0,2186	0,2247	0,2308
	i	767,0	777,4	787,8	798,2	808,7	819,1	829,7	840,1
	s	1,7144	1,7304	1,7459	1,7608	1,7753	1,7894	1,8032	1,8167
18,0	v	0,1663	0,1719	0,1774	0,1829	0,1884	0,1939	0,1994	0,2048
	i	766,1	776,6	787,1	797,6	808,1	818,6	829,2	839,7
	s	1,7002	1,7163	1,7318	1,7468	1,7613	1,7755	1,7894	1,8030
20	v	0,1492	0,1543	0,1593	0,1643	0,1693	0,1743	0,1792	0,1841
	i	765,2	775,8	786,3	796,9	807,5	818,1	828,7	839,3
	s	1,6875	1,7037	1,7192	1,7343	1,7490	1,7633	1,7772	1,7909
25	v	0,11840	0,12257	0,12670	0,13078	0,13482	0,13883	0,14282	0,14678
	i	763,1	773,9	784,7	795,4	806,1	816,8	827,4	838,1
	s	1,6604	1,6770	1,6928	1,7081	1,7229	1,7373	1,7514	1,7652
30	v	0,09787	0,10143	0,10494	0,10839	0,11181	0,11520	0,11856	0,12190
	i	760,8	771,9	782,9	793,7	804,5	815,3	826,1	836,9
	s	1,6376	1,6544	1,6705	1,6861	1,7012	1,7158	1,7301	1,7441
35	v	0,08321	0,08632	0,08938	0,09239	0,09536	0,09830	0,10122	0,10412
	i	758,5	769,8	781,0	792,0	803,0	813,9	824,8	835,7
	s	1,6180	1,6352	1,6516	1,6674	1,6825	1,6972	1,7116	1,7257
40	v	0,07220	0,07498	0,07771	0,08039	0,08303	0,08564	0,08822	0,09078
	i	756,2	767,8	779,1	790,3	801,5	812,5	823,5	834,5
	s	1,6007	1,6181	1,6348	1,6508	1,6661	1,6810	1,6965	1,7097
45	v	0,06363	0,06616	0,06863	0,07106	0,07344	0,07579	0,07811	0,08041
	i	753,9	765,7	777,4	787,7	799,9	811,1	822,2	833,3
	s	1,5849	1,6027	1,6197	1,6360	1,6518	1,6669	1,6816	1,6959
50	v	0,05676	0,05909	0,06136	0,06358	0,06575	0,06789	0,07001	0,07210
	i	751,7	763,6	775,4	786,9	798,3	809,7	820,9	832,1
	s	1,5708	1,5885	1,6059	1,6225	1,6384	1,6538	1,6687	1,6832
60	v	0,04644	0,04848	0,05045	0,05236	0,05423	0,05606	0,05787	0,05966
	i	746,9	759,3	771,5	783,4	795,2	806,8	818,3	829,7
	s	1,5447	1,5636	1,5816	1,5988	1,6152	1,6308	1,6459	1,6606
70	v	0,03905	0,04088	0,04264	0,04433	0,04598	0,04760	0,04919	0,05075
	i	741,8	754,8	767,4	779,8	791,9	803,8	815,6	827,3
	s	1,5220	1,5417	1,5602	1,5777	1,5943	1,6104	1,6259	1,6410
80	v	0,03348	0,03516	0,03676	0,03830	0,03979	0,04124	0,04267	0,04407
	i	736,5	750,3	763,4	776,1	788,6	800,9	812,9	824,7
	s	1,5013	1,5217	1,5408	1,5590	1,5764	1,5930	1,6088	1,6241

Продолжение табл. 14

тура в °С								
540	560	580	600	620	640	660	680	700
0,3166 851,6 1,8623	0,3246 862,2 1,8752	0,03326 872,8 1,8878	0,3405 883,4 1,9001	0,3485 894,1 1,9122	0,3565 904,8 1,9241	0,3644 915,6 1,9358	0,3724 926,5 1,9473	0,3802 937,4 1,9586
0,2710 851,2 1,8450	0,2779 861,8 1,8579	0,2848 872,4 1,8705	0,2916 883,0 1,8828	0,2985 893,7 1,8949	0,3053 904,5 1,9068	0,3121 915,3 1,9185	0,3189 926,1 1,9300	0,3257 937,1 1,9414
0,2368 850,7 1,8299	0,2429 861,3 1,8428	0,2489 871,9 1,8554	0,2549 882,6 1,8677	0,2609 893,4 1,8799	0,2669 904,2 1,8919	0,2729 915,0 1,9036	0,2789 925,9 1,9151	0,2848 936,8 1,9265
0,2102 850,3 1,8163	0,2156 860,9 1,8293	0,2210 871,5 1,8420	0,2264 882,3 1,8545	0,2317 893,1 1,8667	0,2371 903,9 1,8787	0,2424 914,7 1,8904	0,2478 925,6 1,9019	0,2531 936,6 1,9133
0,1890 849,9 1,8043	0,1939 860,5 1,8174	0,1988 871,1 1,8301	0,2036 881,9 1,8426	0,2085 892,7 1,8548	0,2133 903,6 1,8668	0,2183 914,4 1,8786	0,2229 925,4 1,8902	0,2276 936,3 1,9016
0,15073 848,8 1,7787	0,15465 859,5 1,7918	0,15857 870,2 1,8046	0,1625 881,0 1,8172	0,1664 891,8 1,8295	0,1703 902,7 1,8415	0,1741 913,6 1,8534	0,1780 924,6 1,8651	0,1818 935,6 1,8766
0,12522 847,7 1,7578	0,12852 858,5 1,7710	0,13180 869,3 1,7838	0,13508 880,2 1,7964	0,13834 891,1 1,8087	0,14159 902,0 1,8208	0,14483 913,0 1,8327	0,14807 924,0 1,8444	0,15130 935,0 1,8558
0,10699 846,6 1,7394	0,10985 857,5 1,7527	0,11269 868,3 1,7657	0,11551 879,3 1,7786	0,11832 890,2 1,7910	0,12112 901,2 1,8032	0,12392 912,2 1,8151	0,12671 923,2 1,8268	0,12949 934,3 1,8383
0,09332 845,5 1,7236	0,09584 856,5 1,7371	0,09834 867,4 1,7502	0,10083 878,4 1,7631	0,10331 889,4 1,7756	0,10578 900,4 1,7878	0,10824 911,5 1,7998	0,11069 922,6 1,8116	0,11313 933,7 1,8231
0,08269 844,4 1,7098	0,08495 855,4 1,7233	0,08719 866,5 1,7365	0,08942 877,6 1,7494	0,09164 888,5 1,7619	0,09385 899,6 1,7742	0,09605 910,7 1,7862	0,09824 921,9 1,7980	0,10041 933,1 1,8096
0,07417 843,3 1,6973	0,07622 854,4 1,7109	0,07826 865,5 1,7241	0,08028 876,6 1,7370	0,08229 887,7 1,7496	0,08428 898,9 1,7619	0,08627 910,0 1,7740	0,08825 921,2 1,7858	0,09023 932,4 1,7975
0,06742 841,1 1,6749	0,06316 852,2 1,6888	0,06488 863,6 1,7023	0,06658 874,7 1,7153	0,06828 886,0 1,7280	0,06996 897,3 1,7405	0,07164 908,5 1,7527	0,07331 919,8 1,7646	0,07497 931,2 1,7763
0,05229 888,8 1,6557	0,05381 850,2 1,6698	0,05531 861,6 1,6835	0,05679 873,0 1,6968	0,05826 884,3 1,7096	0,05972 895,7 1,7222	006118 907,0 1,7345	0,06262 918,4 1,7466	0,06406 929,8 1,7584
0,04544 836,4 1,6388	0,04680 848,0 1,6531	0,04813 859,6 1,6670	0,04944 871,1 1,6805	0,05074 882,6 1,6935	0,05204 894,1 1,7062	0,05333 905,5 1,7186	0,05461 917,0 1,7307	0,05588 928,4 1,7426

Давление p в кГ/см²		Температура							
		40	60	80	100	120	140	160	180
90	v	1,0040	1,0130	1,0248	1,0389	1,0556	1,0746	1,0963	1,1211
	i	41,8	61,7	81,6	101,6	121,7	142,0	162,4	183,1
	s	0,1357	0,1971	0,2551	0,3108	0,3628	0,4130	0,4611	0,5075
100	v	1,0036	1,0126	1,0243	1,0384	1,0550	1,0740	1,0957	1,1203
	i	42,1	61,9	81,8	101,8	121,9	142,1	162,5	183,2
	s	0,1356	0,1970	0,2550	0,3101	0,3626	0,4128	0,4608	0,5072
110	v	1,0032	1,0122	1,0239	1,0380	1,0545	1,0735	1,0950	1,1195
	i	42,3	62,1	82,0	102,0	122,1	142,3	162,7	183,3
	s	0,1355	0,1968	0,2548	0,3099	0,3625	0,4126	0,4606	0,5069
120	v	1,0028	1,0117	1,0234	1,0375	1,0540	1,0728	1,0943	1,1188
	i	42,5	62,3	82,2	102,1	122,2	142,4	162,8	183,5
	s	0,1355	0,1967	0,2547	0,3097	0,3623	0,4124	0,4603	0,5066
140	v	1,0019	1,0109	1,0225	1,0365	1,0529	1,0717	1,0930	1,1172
	i	42,9	62,7	82,5	102,5	122,6	142,8	163,1	183,7
	s	0,1352	0,1965	0,2544	0,3094	0,3619	0,4119	0,4598	0,5060
160	v	1,0011	1,0100	1,0216	1,0356	1,0519	1,0705	1,0917	1,1157
	i	43,3	63,1	82,9	102,9	122,9	143,1	163,4	183,9
	s	0,1351	0,1962	0,2541	0,3090	0,3615	1,4115	0,4593	0,5054
180	v	1,0003	1,0092	1,0207	1,0347	1,0508	1,0694	1,0905	1,1143
	i	43,7	63,5	83,3	103,2	123,2	143,3	163,6	184,2
	s	0,1350	0,1959	0,2538	0,3087	0,3611	0,4110	0,4588	0,5048
200	v	0,9995	1,0083	1,0198	1,0337	1,0498	1,0682	1,0892	1,1128
	i	44,1	63,8	83,7	103,6	123,6	143,7	163,9	184,4
	s	0,1347	0,1958	0,2536	0,3084	0,3607	0,4106	0,4583	0,5042
220	v	0,9986	1,0075	1,0190	1,0328	1,0488	1,0671	1,0879	1,1113
	i	44,5	64,2	84,0	103,9	123,9	144,0	164,2	184,7
	s	0,1345	0,1955	0,2533	0,3081	0,3603	0,4101	0,4578	0,5037
240	v	0,9978	1,0067	1,0181	1,0318	1,0478	1,0661	1,0866	1,1099
	i	44,9	64,6	84,4	104,3	124,3	144,3	164,5	184,9
	s	0,1344	0,1953	0,2530	0,3077	0,3599	0,4097	0,4573	0,5031
260	v	0,9970	1,0058	1,0172	1,0309	1,0468	1,0649	1,0854	1,1085
	i	45,3	65,0	84,8	104,6	124,6	144,6	164,8	185,2
	s	0,1342	0,1951	0,2527	0,3074	0,3595	0,4093	0,4568	0,5026
280	v	0,5962	1,0050	1,0164	1,0300	1,0458	1,0639	1,0842	1,1071
	i	45,8	65,4	85,2	105,0	124,9	144,9	165,1	185,5
	s	0,1340	0,1949	0,2525	0,3072	0,3591	0,4088	0,4564	0,5020
300	v	0,9954	1,0042	1,0154	1,0291	1,0448	1,0628	1,0830	1,1057
	i	46,2	65,8	85,5	105,4	125,3	145,2	165,4	185,7
	s	0,1338	0,1947	0,2522	0,3068	0,3587	0,4084	0,4559	0,5015

Продолжение табл. 14

тура в °С								
200	220	240	260	280	300	320	340	360
1,1494 204,2 0,5532	1,1822 225,7 0,5977	1,2206 247,9 0,6417	1,2669 270,9 0,6858	1,3250 295,0 0,7300	1,4024 321,1 0,7764	0,02336 677,7 1,3968	0,02554 698,2 1,4303	0,02744 715,4 1,4579
1,1485 204,3 0,5527	1,1810 225,8 0,5973	1,2192 247,9 0,6412	1,2650 270,9 0,6852	1,3222 294,9 0,7293	1,3979 320,7 0,7751	0,01988 666,0 1,3688	0,02210 689,4 1,4071	0,02397 708,6 1,4376
1,1476 204,4 0,5523	1,1799 225,9 0,5968	1,2177 247,9 0,6407	1,2631 270,9 0,6845	1,3194 294,7 0,7285	1,3937 320,4 0,7739	0,01689 652,5 1,3388	0,01925 679,6 1,3835	0,02112 701,0 1,4179
1,1466 204,5 0,5520	1,1788 225,9 0,5964	1,2163 248,0 0,6402	1,2613 270,8 0,6839	1,3169 294,6 0,7278	1,3897 320,1 0,7729	1,495 348,8 0,8225	0,01679 669,1 1,3594	0,01870 692,8 1,3978
1,1448 204,7 0,5513	1,1766 226,1 0,5955	1,2136 248,0 0,6392	1,2576 270,8 0,6827	1,3118 294,5 0,7263	1,3820 319,5 0,7709	1,481 347,5 0,8189	0,01253 642,8 1,3055	0,01471 674,5 1,3563
1,1430 204,9 0,5506	1,1744 226,2 0,5946	1,2108 248,1 0,6382	1,2541 270,7 0,6816	1,3070 294,4 0,7250	1,3746 319,1 0,7690	1,468 346,4 0,8159	1,621 379,4 0,8708	0,01154 651,8 1,3112
1,1412 205,1 0,5499	1,1722 226,3 0,5938	1,2082 248,2 0,6372	1,2506 270,7 0,6804	1,3023 294,2 0,7236	1,3678 318,7 0,7673	1,457 345,5 0,8133	1,596 376,9 0,8654	0,00862 620,3 1,2543
1,1395 205,3 0,5492	1,1701 226,5 0,5930	1,2055 248,2 0,6363	1,2472 270,7 0,6792	1,2977 294,0 0,7222	1,3612 318,4 0,7655	1,446 344,7 0,8109	1,573 375,0 0,8611	1,841 416,6 0,9280
1,1379 205,4 0,5485	1,1680 226,6 0,5922	1,2029 248,3 0,6353	1,2439 270,7 0,6781	1,2933 293,9 0,7208	1,3549 318,0 0,7638	1,436 344,2 0,8087	1,554 373,5 0,8575	1,768 411,0 0,9179
1,1362 205,6 0,5577	1,1660 226,7 0,5914	1,2005 248,4 0,6343	1,2408 270,7 0,6769	1,2891 293,8 0,7195	1,3489 317,8 0,7622	1,427 343,6 0,8065	1,538 372,2 0,8544	1,722 407,3 0,9108
1,1345 205,8 0,5472	1,1640 226,9 0,5906	1,1980 248,5 0,6334	1,2376 270,7 0,6758	1,2850 293,7 0,7181	1,3433 317,5 0,7605	1,418 343,0 0,8043	1,523 371,1 0,8513	1,688 404,5 0,9055
1,1328 206,0 0,5466	1,1621 227,0 0,5898	1,1956 248,6 0,6324	1,2347 270,7 0,6747	1,2811 293,6 0,7167	1,3380 317,3 0,7589	1,410 342,4 0,8022	1,510 370,0 0,8484	1,659 402,2 0,9006
1,1312 206,2 0,5459	1,1602 227,1 0,5890	1,1933 248,6 0,6315	1,2317 270,7 0,6736	1,2773 293,5 0,7154	1,3328 317,0 0,7574	1,403 342,0 0,8002	1,497 369,1 0,8456	1,635 400,2 0,8958

Давление p в кГ/см²		Температура							
		380	400	420	440	460	480	500	520
90	v	0,02914	0,03070	0,03218	0,03360	0,03497	0,03630	0,03760	0,03887
	i	731,0	745,5	759,1	772,4	785,3	797,8	810,1	822,2
	s	1,4818	1,5033	1,5232	1,5421	1,5601	1,5772	1,5934	1,6089
100	v	0,02562	0,02711	0,02851	0,02984	0,03111	0,03234	0,03354	0,03471
	i	725,3	740,6	754,9	768,6	781,9	794,8	807,3	819,6
	s	1,4632	1,4858	1,5066	1,5263	1,5449	1,5624	1,5789	1,5946
110	v	0,02273	0,02416	0,02549	0,02675	0,02794	0,02909	0,08021	0,03130
	i	719,2	735,5	750,5	764,7	778,4	791,6	804,4	817,1
	s	1,4456	1,4694	1,4912	1,5115	1,5304	1,5483	1,5653	1,5815
120	v	0,02027	0,02168	0,02297	0,02417	0,02530	0,03639	0,02744	0,02847
	i	712,7	730,1	745,9	760,7	774,8	788,4	801,5	814,4
	s	1,4282	1,4537	1,4765	1,4975	1,5170	1,5353	1,5527	1,5693
140	v	0,01637	0,01775	0,01896	0,02008	0,02114	0,02213	0,02306	0,02397
	i	698,7	718,7	736,3	752,4	767,4	781,7	795,6	809,0
	s	1,3935	1,4234	1,4487	1,4713	1,4921	1,5115	1,5298	1,5471
160	v	0,01332	0,01471	0,01591	0,01699	0,01798	0,01890	0,01977	0,02061
	i	682,4	706,0	725,9	748,6	759,7	774,9	789,5	803,5
	s	1,3584	1,3934	1,4222	1,4468	1,4689	1,4895	1,5087	1,5267
180	v	0,01082	0,012331	0,01351	0,01456	0,01551	0,01638	0,01720	0,01797
	i	663,6	691,8	714,7	734,2	751,6	767,8	783,2	797,8
	s	1,3218	1,3643	1,3967	1,4235	1,4474	1,4690	1,4893	1,5084
200	v	0,00870	0,01033	0,01156	0,01259	0,01352	0,01436	0,01514	0,01587
	i	640,3	675,8	702,2	724,1	743,2	760,6	776,7	791,9
	s	1,2780	1,3334	1,3706	1,4007	1,4266	1,4499	1,4713	1,4911
220	v	0,00660	0,00862	0,00992	0,01098	0,01189	0,01271	0,01345	0,01414
	i	607,0	657,0	688,8	713,5	734,2	752,8	769,9	786,0
	s	1,2218	1,2986	1,3447	1,3782	1,4064	1,4314	1,4537	1,4744
240	v	0,00370	0,00708	0,00581	0,00959	0,01052	0,01134	0,01206	0,01271
	i	564,2	633,9	673,5	701,5	724,9	744,9	763,1	779,7
	s	1,0945	1,2604	1,3180	1,3559	1,3866	1,4132	1,4367	1,4583
260	v	0,00217	0,00565	0,00724	0,00836	0,00931	0,01014	0,01085	0,01148
	i	502,5	604,8	653,8	688,7	715,3	736,8	756,0	773,4
	s	0,9872	1,2152	1,2886	1,3331	1,3667	1,3953	1,4204	1,4433
280	v	0,00202	0,00429	0,00614	0,00732	0,00828	0,00911	0,00982	0,01044
	i	455,7	567,6	630,5	675,1	704,8	728,5	748,8	767,2
	s	0,9695	1,1575	1,2565	1,3092	1,3469	1,3782	1,4048	1,4285
300	v	0,00190	0,00307	0,00520	0,00645	0,00743	0,00825	0,00895	0,00957
	i	440,9	517,8	603,3	658,8	693,7	719,8	741,6	760,9
	s	0,9580	1,0851	1,2206	1,2833	1,3266	1,3608	1,3892	1,4141

Продолжение табл. 14

тура в °С								
540	560	580	600	620	640	660	680	700
0,04012 834,1 1,6238	0,04134 845,9 1,6383	0,04254 857,7 1,6523	0,04373 869,3 1,6659	0,04491 880,9 1,6790	0,04607 892,5 1,6918	0,04723 904,0 1,7043	0,04838 915,6 1,7166	0,04952 927,1 1,7286
0,03585 831,7 1,6099	0,03697 843,7 1,6246	0,03807 855,6 1,6389	0,03916 857,4 1,6526	0,04023 879,1 1,6659	0,04129 890,8 1,6788	0,04235 902,5 1,6915	0,04339 914,1 1,7088	0,04443 925,8 1,7159
0,03236 829,4 1,5970	0,03340 841,6 1,6121	0,03442 853,7 1,6266	0,03542 865,6 1,6405	0,03640 877,4 1,6540	0,03738 889,2 1,6671	0,03835 901,0 1,6798	0,03931 912,7 1,6923	0,04026 924,4 1,7044
0,02946 827,0 1,5852	0,03042 839,4 1,6005	0,03137 851,7 1,6151	0,03230 863,6 1,6292	0,03321 875,6 1,6429	0,03412 887,5 1,6560	0,03502 899,4 1,6689	0,03591 911,3 1,6814	0,03679 923,1 1,6937
0,02486 822,0 1,5635	0,02572 834,8 1,5793	0,02656 847,4 1,5943	0,02739 859,8 1,6088	0,02820 872,0 1,6227	0,02900 884,2 1,6362	0,02978 896,4 1,6493	0,03056 908,4 1,6621	0,03133 920,3 1,6746
0,02142 817,0 1,5439	0,02220 830,2 1,5603	0,02296 843,2 1,5759	0,02370 855,9 1,5907	0,02443 868,4 1,6050	0,02515 880,8 1,6188	0,02585 893,2 1,6321	0,02655 905,4 1,6450	0,02723 917,6 1,6577
0,01872 811,9 1,5263	0,01945 825,5 1,5431	0,02015 838,8 1,5591	0,02083 851,9 1,5743	0,02150 864,8 1,5888	0,02215 877,5 1,6029	0,02279 890,0 1,6164	0,02342 902,5 1,6296	0,02404 914,8 1,6425
0,01658 806,6 1,5096	0,01725 820,7 1,5270	0,01790 834,4 1,5436	0,01854 847,8 1,5592	0,01915 861,0 1,5740	0,01975 873,9 1,5884	0,02085 886,8 1,6023	0,02093 899,4 1,6157	0,02150 911,9 1,6287
0,01480 801,2 1,4937	0,01544 815,7 1,5120	0,01606 829,8 1,5291	0,01665 843,7 1,5450	0,01723 857,2 1,5608	0,01779 870,4 1,5750	0,01834 883,4 1,5891	0,01888 896,3 1,6028	0,01941 909,0 1,6160
0,01334 795,6 1,4785	0,01394 810,8 1,4974	0,01452 825,3 1,5151	0,01509 839,6 1,5318	0,01563 853,4 1,5474	0,01616 866,9 1,5624	0,01667 880,1 1,5767	0,01717 893,2 1,5906	0,01767 906,2 1,6041
0,01209 790,0 1,4633	0,01267 805,8 1,4838	0,01323 820,7 1,5021	0,01377 835,4 1,5192	0,01428 849,6 1,5352	0,01478 863,4 1,5505	0,01527 876,9 1,5652	0,01575 890,2 1,5793	0,01621 903,4 1,5930
0,01102 784,4 1,4505	0,01158 800,6 1,4709	0,01212 816,1 1,4897	0,01264 831,2 1,5072	0,01313 845,7 1,5236	0,01361 859,9 1,5392	0,01407 873,7 1,5543	0,01452 887,2 1,5687	0,01496 900,6 1,5824
0,01012 778,7 1,4369	0,01066 795,4 1,4581	0,01118 811,5 1,4777	0,01167 827,0 1,4958	0,01214 841,9 1,5126	0,01260 856,3 1,5286	0,01304 870,4 1,5438	0,01346 884,1 1,5585	0,01388 897,7 1,5725

Истинная теплоемкость перегретого водя

p в кГ/см² \ t° C	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
1	0,354	0,355	0,356	0,358	0,360	0,362	0,364	0,367	0,370	0,372	0,375	0,378	0,381	0,384
5	—	0,385	0,380	0,377	0,375	0,374	0,374	0,375	0,377	0,379	0,381	0,383	0,385	0,387
10	—	—	0,415	0,404	0,396	0,391	0,388	0,387	0,386	0,387	0,387	0,388	0,390	0,392
20	—	—	—	—	—	—	0,421	0,412	0,407	0,404	0,402	0,400	0,401	0,401
30	—	—	—	—	—	—	—	0,443	0,431	0,423	0,417	0,413	0,411	0,410
40	—	—	—	—	—	—	—	—	0,458	0,444	0,433	0,427	0,423	0,420
50	—	—	—	—	—	—	—	—	0,487	0,467	0,451	0,441	0,434	0,430
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,493	0,472	0,457	0,447	0,441
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,522	0,495	0,475	0,460	0,452
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,520	0,495	0,475	0,463
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,548	0,516	0,491	0,475
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,538	0,509	0,488
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,562	0,529	0,502
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,589	0,548	0,517
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,569	0,534
140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,592	0,552
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,618	0,571
160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,647	0,591
170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,680	0,612
180	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,719	0,635
190	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,764	0,660
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,818	0,688
210	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,719
220	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,756
230	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
240	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
270	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
290	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 15

ного пара при постоянном объеме c_v в $\frac{ккал}{кГ \cdot град}$

420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
0,387	0,391	0,394	0,397	0,400	0,403	0,407	0,410	0,413	0,416	0,419	0,423	0,426	0,429	0,432
0,390	0,393	0,396	0,399	0,402	0,405	0,408	0,411	0,414	0,417	0,421	0,424	0,427	0,430	0,433
0,394	0,397	0,399	0,402	0,404	0,407	0,410	0,413	0,416	0,419	0,422	0,425	0,428	0,431	0,434
0,402	0,404	0,405	0,407	0,409	0,411	0,414	0,416	0,419	0,421	0,424	0,427	0,430	0,433	0,436
0,410	0,411	0,411	0,412	0,414	0,415	0,417	0,419	0,422	0,424	0,427	0,429	0,432	0,435	0,438
0,418	0,418	0,417	0,417	0,418	0,419	0,421	0,423	0,425	0,427	0,429	0,431	0,434	0,437	0,440
0,427	0,425	0,424	0,423	0,423	0,425	0,425	0,426	0,428	0,430	0,432	0,434	0,436	0,438	0,441
0,436	0,432	0,430	0,428	0,428	0,429	0,429	0,430	0,431	0,432	0,434	0,436	0,438	0,440	0,443
0,445	0,440	0,437	0,434	0,433	0,433	0,433	0,433	0,434	0,435	0,437	0,438	0,440	0,442	0,444
0,454	0,448	0,443	0,440	0,438	0,437	0,437	0,436	0,437	0,438	0,439	0,440	0,442	0,444	0,446
0,464	0,456	0,450	0,446	0,443	0,442	0,441	0,439	0,440	0,440	0,441	0,442	0,444	0,446	0,448
0,474	0,464	0,457	0,452	0,449	0,446	0,444	0,443	0,443	0,443	0,444	0,445	0,446	0,448	0,449
0,484	0,473	0,464	0,458	0,454	0,451	0,448	0,447	0,446	0,446	0,447	0,447	0,448	0,449	0,451
0,495	0,482	0,472	0,464	0,459	0,455	0,452	0,451	0,449	0,449	0,449	0,449	0,450	0,451	0,453
0,507	0,491	0,479	0,471	0,465	0,460	0,456	0,454	0,453	0,452	0,452	0,452	0,452	0,453	0,455
0,519	0,500	0,487	0,477	0,470	0,465	0,461	0,458	0,456	0,455	0,455	0,454	0,454	0,455	0,456
0,531	0,510	0,495	0,484	0,476	0,470	0,465	0,461	0,459	0,457	0,457	0,556	0,456	0,457	0,458
0,545	0,521	0,503	0,491	0,481	0,474	0,469	0,465	0,462	0,460	0,460	0,459	0,458	0,459	0,460
0,559	0,531	0,512	0,498	0,487	0,479	0,473	0,469	0,465	0,463	0,462	0,461	0,460	0,461	0,461
0,574	0,542	0,520	0,505	0,493	0,484	0,477	0,472	0,469	0,466	0,465	0,464	0,463	0,462	0,462
0,590	0,554	0,529	0,512	0,499	0,489	0,482	0,476	0,472	0,469	0,467	0,466	0,465	0,464	0,464
0,607	0,566	0,538	0,519	0,505	0,494	0,486	0,480	0,475	0,472	0,469	0,468	0,467	0,466	0,466
0,625	0,579	0,548	0,526	0,511	0,499	0,490	0,484	0,479	0,475	0,472	0,471	0,469	0,468	0,467
0,645	0,592	0,558	0,534	0,517	0,504	0,495	0,487	0,482	0,478	0,475	0,473	0,471	0,470	0,469
0,667	0,606	0,568	0,542	0,523	0,509	0,499	0,491	0,485	0,480	0,477	0,475	0,473	0,472	0,471
0,691	0,621	0,578	0,549	0,529	0,514	0,503	0,495	0,488	0,483	0,479	0,477	0,475	0,474	0,473
0,716	0,637	0,589	0,557	0,535	0,520	0,508	0,499	0,492	0,486	0,482	0,479	0,477	0,475	0,474
0,748	0,655	0,600	0,566	0,542	0,525	0,512	0,502	0,495	0,489	0,484	0,481	0,479	0,477	0,476
—	0,673	0,612	0,574	0,548	0,530	0,517	0,506	0,498	0,492	0,487	0,483	0,481	0,479	0,478
—	0,692	0,624	0,583	0,555	0,535	0,521	0,510	0,501	0,494	0,489	0,485	0,483	0,481	0,479
—	0,711	0,636	0,591	0,561	0,541	0,525	0,513	0,504	0,497	0,491	0,487	0,485	0,483	0,481
—	0,731	0,648	0,600	0,568	0,546	0,529	0,517	0,508	0,500	0,494	0,490	0,487	0,484	0,482

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Соплом называется канал с таким профилем, что при движении по нему газа происходит увеличение скорости потока, уменьшение давления и увеличение объема. В сопле происходит превращение потенциальной энергии в кинетическую энергию газа.

Диффузором называется канал с таким профилем, что при движении по нему газа происходит увеличение давления газа и уменьшение скорости потока (уменьшение кинетической энергии).

Исходные уравнения:

Уравнение сплошности

$$G = \frac{fw}{v} = \frac{f_1 w_1}{v_1} = \frac{f_2 w_2}{v_2} = \ldots = \text{const},$$

где G — вес газа, протекающего через поперечное сечение канала в единицу времени; f — площадь поперечного сечения канала; w — скорость движения газа в сечении f; v — удельный объем газа.

Уравнение первого закона термодинамики для потока

$$dq = du + Adl_1 + A\frac{dw^2}{2g},$$

где dq — внешнее тепло, получаемое газом; du — изменение внутренней энергии газа; dl_1 — работа газа против внешнего давления при движении газа; $\frac{dw^2}{2g}$ — приращение кинетической энергии движения на рассматриваемом участке потока.

Располагаемой работой l_0 называется приращение внешней кинетической энергии

$$dl_0 = \frac{dw^2}{2g}; \quad dl_0 = -vdp.$$

Работа газа против внешнего давления

$$dl_1 = d(p \cdot v).$$

Работа расширения

$$dl = pdv; \quad dl = dl_1 + dl_0.$$

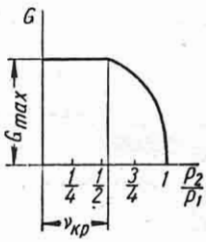
Адиабатическое истечение. Истечение жидкости.

Скорость истечения

$$w = \sqrt{2gh},$$

где $h = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$ — высота напора; g — ускорение силы тяжести.

Истечение газа. Отношение давлений $\frac{p_2}{p_1}$, при котором расход газа становится максимальным и при дальнейшем понижении давления p_2 не изменяется, называется критическим отношением давлений и обозначается $\nu_{кр}$ (иногда $\beta_{кр}$) (фиг. 43); давление p_2, соответствующее $\nu_{кр}$, называется критическим давлением и обозначается $p_{кр}$, а скорость — критической скоростью и обозначается $w_{кр}$. Критическая скорость равна скорости звука в газовой среде, имеющей состояние, определяемое параметрами $p_{кр}$, $v_{кр}$. Значения критического отношения давлений можно вычислять по выражению $\nu_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$; для одноатомного газа $k = 1{,}67$; $\nu_{кр} = 0{,}489$; для двухатомного $k = 1{,}4$; $\nu_{кр} = 0{,}528$; для трех- и многоатомного газа $k = 1{,}29$; $\nu_{кр} = 0{,}548$.



Фиг. 43. Зависимость расхода от $\frac{p_2}{p_1}$.

Определение скорости w и расхода G при заданных p_1 и p_2 для суживающегося сопла и сопла постоянного профиля:

1) $\frac{p_2}{p_1} > \nu_{кр}$:

$$w = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}p_1 v_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]};$$

$$w = \sqrt{2gl_0} = \sqrt{2g\frac{1}{A}(i_1 - i_2)} = 91{,}53\sqrt{i_1 - i_2};$$

$$G = f\sqrt{2g\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}.$$

2) $\frac{p_2}{p_1} \leqslant \nu_{кр}$:

$$w_{кр} = \sqrt{2g\frac{k}{k+1}p_1 v_1};$$

$$w_{кр} = 91{,}53\sqrt{i_1 - i_{кр}};$$

$$G_{max} = f\sqrt{2g\frac{k}{k+1}\frac{p_1}{v_1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}.$$

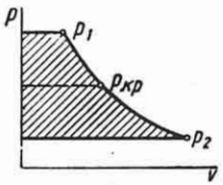
Для двухатомного газа

$$k = 1{,}4;\ w_{kp} = 3{,}38\sqrt{RT_1} = 3{,}38\sqrt{p_1v_1};$$

$$G_{max} = 2{,}15f\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}.$$

Недостаток суживающегося сопла или сопла постоянного профиля — неполное использование располагаемого перепада давлений в широком диапазоне его изменения (фиг. 44).

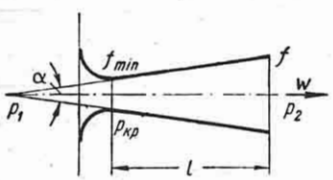
Фиг. 44.



Фиг. 45.

Расширяющееся сопло (сопло Лаваля). Для получения скоростей бо́льших, чем критическая скорость, и для полного использования перепада давлений (фиг. 45) применяется расширяющееся сопло (фиг. 46).

Угол конусности $\alpha = 10 \div 12°$ (при больших углах конусности возможен



Фиг. 46. Расширяющееся сопло.

отрыв струи от стенок сопла, вызывающий дополнительные сопротивления).

Площадь минимального сечения

$$f_{min} = \frac{G \cdot v_{kp}}{w_{kp}};$$

для двухатомных газов

$$f_{min} = \frac{G}{2{,}15\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}};$$

для многоатомных газов

$$f_{min} = \frac{G}{2{,}09\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}}.$$

Площадь выходного сечения сопла

$$f = f_{min}\frac{w_{kp} \cdot v_2}{w \cdot v_{kp}},$$

где

$$w = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]};$$

$v_2 = v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}$ — удельный объем газа при давлении среды p_2.

Длина расширяющейся части сопла

$$l = \frac{d - d_{min}}{2\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}},$$

где d и d_{min} — диаметры соответственно выходного и минимального сечения; α — угол конусности расширяющейся части.

Истечение водяного пара. Общие законы и термодинамические соотношения для процесса истечения газа справедливы и для истечения пара. При приближенных расчетах можно принимать для перегретого пара $\nu_{kp} = 0{,}55$; для сухого насыщенного пара ν_{kp} определяется из условия, что $k = 1{,}135$; для влажного насыщенного пара $k = 1{,}035 + 0{,}1x$.

Однако значение k для пара не остается постоянным в процессе изменения его состояния, и в случае точных расчетов их следует проводить графо-аналитически с применением $i - s$-диаграммы водяного пара и следующих соотношений:

1) $\frac{p_2}{p_1} > \nu_{kp}$:

$$w = 91{,}53\sqrt{i_1 - i_2};$$

$$G = \frac{91{,}53f\sqrt{i_1 - i_2}}{v_2}.$$

2) $\frac{p_2}{p_1} \leqslant \nu_{kp}$:

$$w = w_{kp} = 91{,}53\sqrt{i_1 - i_{kp}};$$

$$G = G_{max} = \frac{91{,}53f\sqrt{i_1 - i_{kp}}}{v_{kp}}.$$

При расширении пара до давлений меньше критического и для получения сверхзвуковых скоростей применяется расширяющееся сопло, у которого площадь минимального сечения

$$f_{\min} = \frac{G \cdot v_{кр}}{91{,}53\sqrt{i_1 - i_{кр}}};$$

площадь выходного сечения

$$f = \frac{G \cdot v_2}{91{,}53\sqrt{i_1 - i_2}};$$

длина расширяющейся части

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}},$$

где $\alpha = 10 \div 12°$.

ДРОССЕЛИРОВАНИЕ (МЯТИЕ) ГАЗОВ И ПАРОВ

Дросселированием называется снижение давления газа или жидкости при прохождении через суженное сечение (вентиль, кран) при отсутствии теплообмена с окружающей средой; поток при этом не производит внешней работы.

Дросселирование — процесс необратимый, протекающий с возрастанием энтропии. Энтальпия газа в начальном и конечном состояниях при дросселировании одинакова: $i_1 = i_2$ (это не распространяется на промежуточные состояния).

Эффект Джоуля-Томсона. Так как при дросселировании

$$i_1 = i_2;\ di = c_p dt = 0,$$

то для идеального газа температура при дросселировании остается неизменной.

Реальные газы при дросселировании изменяют свою температуру. Это изменение температуры носит название эффекта Джоуля-Томсона и используется для сжижения газов.

Дифференциальный эффект

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i.$$

Для воздуха в первом приближении

$$\alpha_i = \frac{1}{4}\ \frac{град}{ama}.$$

Дифференциальное уравнение эффекта

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = A\,\frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p}.$$

Возможные случаи:

$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v > 0;\ dT < 0$ — температура газа понижается;

$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v < 0;\ dT > 0$ — температура газа возрастает;

$T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v = 0;\ dT = 0$ — температура газа остается неизменной.

Температура газа в процессе дросселирования в зависимости от его начального состояния может увеличиваться, уменьшаться или оставаться без изменения; последнее состояние является „поворотным" для знака эффекта.

Начальная температура, при которой наблюдается явление изменения знака эффекта для данного газа, называется температурой инверсии (табл. 16).

Таблица 16

Температура инверсии [3]

Газ	Критическая температура $T_к$ в °К	Температура инверсии	
		$T^* = 6{,}75T_к$ в °К	t^* в °С
He	5,3	35,8	−237,4
H_2	33,3	225	− 48,2
N_2	126,1	850	576,8
O_2	154,4	1040	766,8
H_2O пар	647,2	4360	4086,8
CO_2	304,2	2050	1776,8

Температура инверсии $T^* = v\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p$;

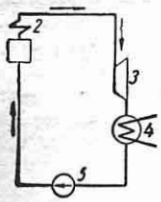
$$T^* \approx 6{,}75T_к,$$

где $T_к$ — критическая температура газа.

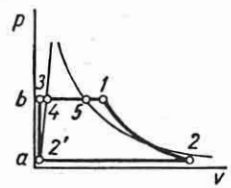
Общие теоретические положения для процесса дросселирования газа справедливы и для дросселирования пара.

ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

На фиг. 47 изображена схема паросиловой установки, состоящей из парового котла *1*, пароперегревателя *2*, парового двигателя *3*, конденсатора *4* и насоса *5*.

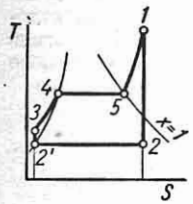


Фиг. 47. Схема паросиловой установки.



Фиг. 48. Цикл паросиловой установки.

На фиг. 49 изображен цикл паросиловой установки в $T-s$-диаграмме: *4—5* — испарение воды в котле при начальном давлении $p_1 = \text{const}$ и температуре $t_{s_1} = \text{const}$; *5—1* — перегрев пара при $p_1 = \text{const}$ до температуры t; в точке *1* давление p_1, энтальпия i_1; *1—2* — адиабатическое расширение в двигателе до конечного давления p_2; энтальпия в точке $2 — i_2$; *2—2'* — полная конденсация при $p_2 = \text{const}$ и $t_{s_2} = \text{const}$; температура в точке $5 — t_{s_2}$. На фиг. 48 представлен цикл паросиловой установки в $p-v$-диаграмме.



Фиг. 49.

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{l_1 - i_n},$$

где i_n — энтальпия питательной воды, $i_n \approx t_{s_2}$.

Работа, совершаемая 1 *кГ* пара за цикл,

$$Al = i_1 - i_2.$$

Расход пара

$$d = \frac{860}{i_1 - i_2} \; кГ/квт\text{-}ч;$$

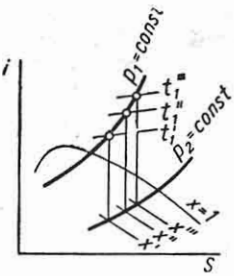
$$d = \frac{632}{i_1 - i_2} \; кГ/л.\ с.\text{-}ч.$$

Совершенство действительного процесса, происходящего в паросиловой установке, можно оценить с помощью так называемого внутреннего относительного к. п. д.

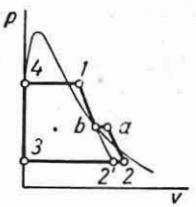
$$\eta_{0i} = \frac{Al_i}{Al},$$

где Al — действительная работа пара в двигателе.

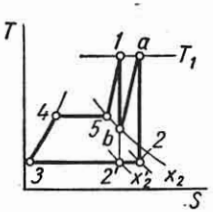
Цикл паросиловой установки с промежуточным перегревом пара. Применяется в установках с высоким давлением для предотвращения большой конечной влажности пара, вредно действующей на лопатки последних ступеней турбины (фиг. 50 и 51, 52 и 53). Промежуточный (повторный) перегрев осуществляется топочными газами или острым паром.



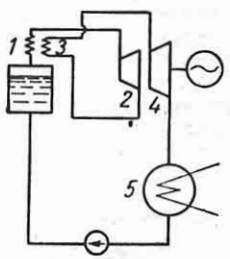
Фиг. 50. Зависимость степени сухости от перегрева при $p = \text{const}$.



Фиг. 51. Цикл паросиловой установки с повторным перегревом пара.



Фиг. 52.



Фиг. 53. Схема паросиловой установки с повторным перегревом пара.

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = \frac{(i_1 - i_в) + (i_a - i_2)}{(i_1 - i_з) + (i_a - i_в)}.$$

Работа, совершаемая 1 *кГ* пара за цикл,

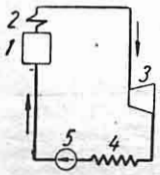
$$Al = (i_1 - i_в) + (i_a - i_2).$$

Расход пара:

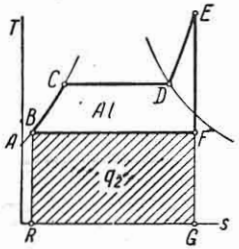
$$d = \frac{632}{(i_1 - i_в) + (i_a - i_2)} \text{ кГ/л. с.-ч},$$

$$d = \frac{860}{(i_1 - i_в) + (i_a - i_2)} \text{ кГ/квт-ч}.$$

Теплофикационный цикл. В условиях планового социалистического хозяйства экономически особенно целесообразно вырабатывать электрическую энергию и тепло комбинированным способом в одной теплосиловой установке, называющейся теплоэлектроцентралью. Такие установки получили в соответствии с решениями ЦК КПСС и Совета министров СССР широкое развитие в энергетическом хозяйстве Советского Союза.



Фиг. 54. Схема теплофикационной установки.



Фиг. 55.

На фиг. 54 приведена схема теплофикационной установки, состоящей из котла *1*, пароперегревателя *2*, турбины *3*, теплового потребителя *4* и насоса *5*.

На фиг. 55 дано соотношение между количеством вырабатываемой механической энергии Al и количеством тепла, отдаваемого тепловому потребителю, q_T.

Термический к. п. д. теплофикационной установки $\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_n}$ вследствие повышения конечных температуры и давления ниже термического к. п. д. конденсационной установки с теми же начальными параметрами.

Однако для идеального случая, в котором не учитываются неизбежные потери, коэффициент использования тепла в комбинированном процессе может быть равен 1.

Комбинированная выработка тепла и электроэнергии характеризуется отношением

$$\xi = \frac{Al}{q_T},$$

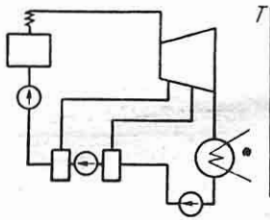
определяющим количество механической энергии, полученной на единицу теплового потребления. Следует стремиться к тому, чтобы на базе данного теплового потребления было выработано максимально возможное количество электрической энергии; техническая целесообразность установки оценивается не только коэффициентом использования тепла, но и коэффициентом ξ: чем он выше, тем выгоднее установка для данной энергетической системы.

При полном использовании тепла коэфициент ξ связан с η_t соотношением

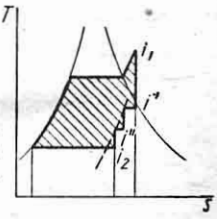
$$\xi = \frac{\eta_t}{1 - \eta_t}.$$

Регенеративный цикл. На современных крупных паросиловых установках (фиг. 56) применяются такие видоизменения их цикла, которые дают возможность приблизить к. п. д. цикла установки к к. п. д. цикла Карно.

Один из способов повышения термического к. п. д. — регенеративный подогрев питательной воды, т. е. подогрев за счет тепла части пара, отбираемого из турбины (фиг. 57).



Фиг. 56. Схема паросиловой установки с регенерацией.



Фиг. 57. Регенеративный цикл.

Циклы с применением регенеративного подогрева получили название регенеративных циклов.

Термический к. п. д. регенеративного цикла с двумя отборами

$$\eta_t = \frac{Al}{q_1} = \frac{i_1 - i'g_1 - i''g_2 - i_2 g}{i_1 - i_n},$$

где g_1 и g_2 — количества отбираемого пара соответственно в первом и втором отборах; g — количество пара, поступившего в конденсатор.

Термический к. п. д. регенеративного цикла для анализа его зависимости от t_p

и числа отборов n может быть также рассчитан по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{\Delta s_1 - n\left(1 - \sqrt[n]{\frac{T_2}{\theta_p}}\right)}{i_1 - t_p} \cdot T_2,$$

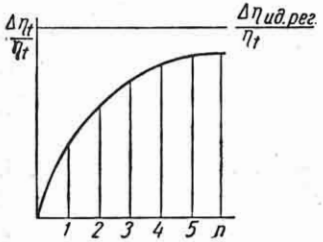
где Δs_1 — разность энтропии свежего пара и воды в конденсаторе; n — число регенеративных подогревателей; T_2 — температура в конденсаторе в °К; θ_p и t_p — температура регенеративного подогрева соответственно в °К и в °С; i_1 — энтальпия свежего пара.

Расход пара

$$d = \frac{860}{Al} =$$

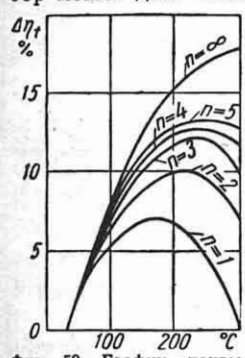
$$= \frac{860}{i_1 - i'g_1 - i''g_2 - i_2g} \text{ кГ/квт-ч.}$$

Как видно из фиг. 58, увеличение к. п. д. ($\Delta\eta_t$) с ростом числа отборов



Фиг. 58. Изменение $\frac{\Delta\eta_t}{\eta_t}$ в зависимости от числа отборов n.

происходит неравномерно; так, один отбор может дать несколько менее половины максимально возможной экономии, но при дальнейшем увеличении числа отборов повышение термического к. п. д. идет медленнее.



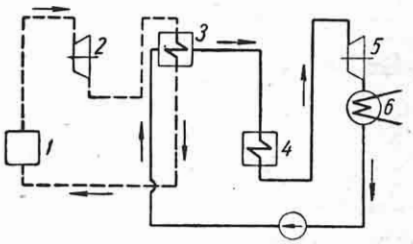
Фиг. 59. График наивыгоднейшей температуры регенеративного подогрева.

При данных начальных параметрах для каждого числа отборов n существует определенная термодинамически наивыгоднейшая температура регенеративного подогрева, увеличивающаяся с ростом числа отборов, как это видно из фиг. 59.

Эта температура может быть определена по формуле

$$\theta_p^{наив} = \frac{T_2}{(1-\eta_t)^{\frac{n}{n+1}}}.$$

Бинарные циклы. Циклы с двумя рабочими веществами получили название бинарных. Применение бинарных циклов вызвано стремлением к увеличению экономичности теплосиловых установок.

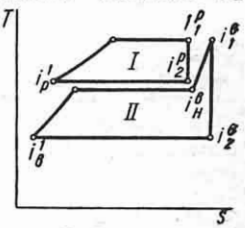


Фиг. 60. Схема ртутно-водяной бинарной установки.

На практике осуществлены только ртутно-водяные бинарные установки; схема такой установки показана на фиг. 60.

На фиг. 61 изображен ртутно-водяной цикл в T — s-диаграмме.

Для испарения каждого килограмма воды необходимо сконденсировать 8—10 $кГ$ ртути.



Фиг. 61. Ртутно-водяной цикл.

Кратностью циркуляции ртути m называется отношение

$$m = \frac{G^p}{G_в}; \quad m = \frac{i^в_н - i'_в}{i^p_2 - i'_p}.$$

Термический к. п. д. бинарного цикла с перегревом водяного пара

$$\eta_t = \frac{AL^p + Al^в}{Q_1} = \frac{m\left(i^p_1 - i^p_2\right) + \left(i^в_1 - i^в_2\right)}{m\left(i^p_1 - i'_p\right) + \left(i^в_1 - i^в_н\right)},$$

где индексы энтальпий соответствуют обозначениям на T — s-диаграмме.

В табл. 17 приведены параметры сухого насыщенного ртутного пара.

Таблица 17

Сухой насыщенный ртутный пар [3]

Давление пара p в *ата*	Температура насыщенного пара t в °С	Энтальпия жидкости i'	Энтальпия i''	Теплота парообразования	Энтропия		Удельный объем	
					жидкости s'	пара s''	жидкости v'	пара v''
		в *ккал/кГ*			в *ккал/кГ °К*		в *м³/кГ*	
0,001	118,5	3,96	76,22	72,26	0,0119	0,1959	0,0000752	165,9
0,002	134,6	4,45	76,61	72,16	0,0132	0,1902	0,0000754	86,16
0,003	144,1	4,76	76,86	72,10	0,0139	0,1867	0,0000755	58,78
0,004	151,2	4,98	77,03	72,05	0,0145	0,1843	0,0000756	44,84
0,005	161,5	5,31	77,32	71,98	0,0152	0,1808	0,0000758	30,62
0,008	168,9	5,58	77,62	71,94	0,0158	0,1785	0,0000759	23,35
0,010	175,0	5,79	77,69	71,90	0,0162	0,1767	0,0000760	18,94
0,015	186,6	6,16	77,98	71,82	0,0171	0,1733	0,0000761	12,95
0,02	195,0	6,44	78,20	71,76	0,0178	0,1711	0,0000762	9,893
0,03	207,6	6,85	78,53	71,68	0,0186	0,1677	0,0000764	6,772
0,04	216,9	7,16	78,78	71,62	0,0193	0,1654	0,0000765	5,178
0,05	221,5	7,41	78,98	71,57	0,0198	0,1636	0,0000766	4,206
0,06	230,9	7,63	79,16	71,53	0,0202	0,1621	0,0000767	3,550
0,08	241,0	7,98	79,44	71,46	0,0208	0,1598	0,0000769	2,716
0,10	249,6	8,25	79,66	71,41	0,0213	0,1580	0,0000770	2,209
0,12	256,7	8,48	79,84	71,36	0,0218	0,1565	0,0000771	1,866
0,14	262,7	8,68	80,00	71,32	0,0222	0,1553	0,0000772	1,618
0,16	268,0	8,86	80,14	71,28	0,0225	0,1542	0,0000772	1,430
0,18	272,9	9,02	80,27	71,25	0,0228	0,1533	0,0000773	1,282
0,20	277,3	9,16	80,38	71,22	0,0231	0,1525	0,0000774	1,1632
0,25	286,7	9,46	80,62	71,16	0,0236	0,1507	0,0000775	0,9464
0,3	294,4	9,73	80,84	71,11	0,0241	0,1494	0,0000776	0,7995
0,4	308,0	10,18	81,19	71,01	0,0249	0,1471	0,0000779	0,6140
0,5	318,8	10,55	81,49	70,94	0,0255	0,1458	0,0000780	0,5003
0,6	328,0	10,86	81,74	70,88	0,0260	0,1439	0,0000781	0,4234
0,7	335,9	11,12	81,94	70,82	0,0265	0,1428	0,0000783	0,3677
0,8	340,7	11,34	82,01	70,77	0,0269	0,1418	0,0000783	0,3253
0,9	349,2	11,56	82,29	70,73	0,0272	0,1408	0,0000784	0,2922
1,0	355,9	11,76	82,45	70,68	0,0275	0,1400	0,0000785	0,2655
1,2	365,8	12,11	82,66	70,62	0,0280	0,1386	0,0000787	0,2240
1,4	374,0	12,58	82,94	70,56	0,0285	0,1375	0,0000788	0,1953
1,6	381,9	12,64	83,14	70,50	0,0290	0,1366	0,0000789	0,1730
1,8	389,3	12,90	83,35	70,45	0,0294	0,1357	0,0000790	0,1555
2,0	395,8	13,11	83,51	70,40	0,0297	0,1349	0,0000791	0,1414
2,2	401,7	13,32	83,68	70,36	0,0300	0,1342	0,0000792	0,1296
2,4	407,4	13,54	83,86	70,32	0,0303	0,1335	0,0000793	0,1198
2,6	412,4	13,70	83,98	70,28	0,0305	0,1329	0,0000794	0,1114
2,8	417,0	13,87	84,11	70,24	0,0307	0,1324	0,0000794	0,1043
3,0	422,4	14,04	84,25	70,21	0,0309	0,1320	0,0000795	0,09798
3,5	432,8	14,40	84,53	70,13	0,0315	0,1303	0,0000797	0,08524
4,0	442,4	14,74	84,80	70,06	0,0319	0,1298	0,0000798	0,07558
4,5	451,0	15,03	85,02	69,99	0,0323	0,1289	0,0000799	0,06801
5,0	458,0	15,30	85,28	69,93	0,0327	0,1282	0,0000801	0,06487
5,5	466,8	15,56	85,48	69,87	0,0331	0,1276	0,0000802	0,05682
6,0	472,8	15,78	85,59	69,84	0,0334	0,1270	0,0000803	0,05254

Продолжение табл. 17

Давление пара p в *ата*	Температура насыщенного пара t в °С	Энтальпия жидкости i'	Энтальпия i''	Теплота парообразования r	Энтропия		Удельный объем	
					жидкости s'	пара s''	жидкости v'	пара v''
		в *ккал/кГ*			в *ккал/кГ*° К		в *м³/кГ*	
7,0	485,1	16,20	85,91	69,74	0,0339	0,1258	0,0000805	0,04578
8,0	496,3	16,59	86,20	69,61	0,0344	0,1249	0,0000806	0,04065
9	506,3	16,94	86,47	69,53	0,0349	0,1241	0,0000808	0,03660
10	515,5	17,25	86,70	69,45	0,0356	0,1234	0,0000809	0,03383
12	532,3	17,85	87,15	69,30	0,0360	0,1220	0,0000812	0,02837
14	546,7	18,35	87,54	69,16	0,0366	0,1210	0,0000814	0,02476
16	559,8	18,84	87,84	69,03	0,0372	0,1201	0,0000816	0,02200
18	571,4	19,28	88,14	68,91	0,0377	0,1193	0,0000818	0,01933
20	582,4	19,62	88,42	68,80	0,0384	0,1185	0,0000819	0,01806
25	606,5	20,46	89,00	68,54	0,0391	0,1170	0,0000823	0,01487
30	627,1	21,18	89,48	68,30	0,0399	0,1158	0,0000827	0,01268
35	645,0	21,83	89,91	68,08	0,0406	0,1147	0,0000830	0,01109
40	661,8	22,41	90,28	67,87	0,0412	0,1138	0,0000832	0,009873
45	677,0	22,90	90,62	67,67	0,0418	0,1130	0,0000835	0,008923
50	690,9	23,44	90,91	67,47	0,0423	0,1123	0,0000837	0,008148

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА ИСКУССТВЕННОГО ХОЛОДА

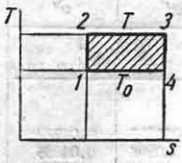
Холодильные агенты. Холодильным агентом называется вещество, которое при кипении в испарителе холодильной машины воспринимает тепло от охлаждаемого объекта и отдает это тепло окружающей среде при последующем своем сжижении в конденсаторе. В табл. 18 приведены физические параметры наиболее распространенных холодильных агентов.

Таблица 18

Физические свойства холодильных агентов [28]

Название агента	Химическая формула	Молекулярный вес	Нормальная температура кипения $t_{кип}$ в °С	Критическая температура $t_{кр}$ в °С	Критическое давление $p_{кр}$ в *кГ/см²*	Критический объем $v_{кр}$ в *л/кГ*	Температура затвердевания $t_{зат}$ в °С	Показатель адиабаты $k = \frac{c_p}{c_v}$
Аммиак	NH_3	17,03	— 33,4	+132,9	112,3	4,13	— 77,7	1,30
Сернистый ангидрид	SO_2	64,06	— 10,0	+157,1	77,6	1,92	— 75,2	1,26
Углекислота	CO_2	44,01	— 78,9	+ 31,0	75,0	2,16	— 56,6	1,30
Хлорметил	CH_3Cl	50,49	— 23,8	+143,1	65,9	—	— 97,6	1,20
Дихлорметан	CH_2Cl_2	84,94	+ 39,8	+245,0	60,9	—	— 96,7	1,18
Фреон-11	$CFCl_3$	137,39	+ 23,7	+198,0	44,6	1,80	—111,0	1,15
Фреон-12	CF_2Cl_2	120,92	— 29,8	+111,5	39,6	1,80	—155,0	1,14
Фреон-13	CF_3Cl	104,47	— 81,5	+ 28,8	39,4	1,72	—180,0	—
Фреон-21	$CHFCl_2$	102,93	+ 8,9	+178,5	52,7	—	—135,0	1,16
Фреон-22	CHF_2Cl	86,48	— 40,8	+ 96,0	50,4	1,90	—160,0	1,20
Фреон-23	CHF_3	70,02	— 82,2	—	—	—	—163,0	—
Фреон-113	$CF_2Cl \cdot CFCl_2$	187,37	+ 47,6	+214,1	34,8	1,73	— 35,0	1,09
Фреон-114	$C_2F_4Cl_2$	170,91	+ 4,1	—	—	—	—	—
Фреон-143	$CH_3 \cdot CF_3$	84,04	— 47,3	+ 71,4	42,0	—	—111,3	—
Метан	CH_4	16,04	—161,6	— 82,0	47,3	6,17	—182,6	1,3
Этилен	C_2H_4	28,05	—103,6	+ 9,4	51,4	4,63	—104,0	—
Этан	C_2H_6	30,06	— 88,6	+ 32,1	50,3	4,70	—183,2	1,25
Пропилен	C_3H_6	42,08	— 47,0	+ 91,46	45,4	—	—	—
Пропан	C_3H_8	44,10	— 42,2	+ 96,3	43,4	—	—187,1	1,13
Вода	H_2O	18,02	+100,0	+374,15	225,65	3,10	0,0	—

Термодинамическая характеристика холодильных агентов. Обратный цикл Карно — круговой процесс, совершенный в направлении *2—1—4—3—2* (фиг. 62). В этом процессе затрачивается внешняя работа l, и количество тепла q_0 отнимается у источника с низшей температурой. Этот процесс может рассматриваться как идеальный для холодильных машин. Достоинство работы идеальной холодильной машины определяется отношением



Фиг. 62. Обратный цикл Карно.

$$\varepsilon_k = \frac{q_0}{Al} = \frac{T_0}{T - T_0},$$

носящим название холодильного коэффициента. Отношение коэффициента ε для холодильной машины, работающей на данном агенте, к его значению для обратного цикла Карно характеризует степень термодинамического совершенства применяемого агента.

Выбор надлежащего холодильного агента в современной хладотехнике определяется не только степенью его совершенства в термодинамическом отношении, но и сложным комплексом условий его использования в машине.

Аммиак (NH_3) — наиболее распространенный холодильный агент среднего давления (табл. 19). Область применения — промышленные холодильные машины с поршневыми компрессорами для температур кипения не ниже —70° С.

Достоинства NH_3 как холодильного агента: умеренные значения давлений, достаточно низкая нормальная температура кипения, высокая объемная холодопроизводительность, высокие значения коэффициентов теплоотдачи, легкость обнаружения утечек, доступность.

Недостатки NH_3: ядовитость, коррозирующее действие на медь и ее сплавы, воспламеняемость в смеси с воздухом, частичная диссоциация при высоких температурах.

Сернистый ангидрид (SO_2). Область применения — малые автоматические холодильные машины для торговой сети и домашних холодильников.

Достоинства SO_2: умеренное давление, невоспламеняемость, легкость обнаружения по запаху.

Таблица 19

Свойства насыщенных паров аммиака [28]

Температура t в °С	Давление p в кГ/см²	Удельный объем		Энтальпия в ккал/кГ	
		жидкости v' в л/кГ	пара v'' в м³/кГ	жидкости i'	пара i''
−70	0,1114	1,379	9,009	25,9	375,7
−68	0,1287	1,383	7,870	27,9	376,6
−66	0,1485	1,388	6,882	29,9	377,4
−64	0,1706	1,392	6,044	32,0	378,3
−62	0,1954	1,396	5,324	34,0	379,1
−60	0,2233	1,401	4,699	36,1	380,0
−58	0,2543	1,406	4,161	38,1	380,8
−56	0,2889	1,410	3,693	40,2	381,7
−54	0,3272	1,415	3,288	42,2	382,5
−52	0,3697	1,420	2,933	44,2	383,3
−50	0,4168	1,424	2,623	46,2	384,1
−48	0,4686	1,429	2,351	48,4	384,9
−46	0,5256	1,434	2,112	50,4	385,7
−44	0,5882	1,439	1,901	52,5	386,5
−42	0,6568	1,444	1,715	54,6	387,3
−40	0,7318	1,449	1,550	56,8	388,1
−38	0,8137	1,454	1,404	58,88	388,88
−36	0,9028	1,460	1,275	61,01	389,65
−35	0,9503	1,462	1,215	62,08	390,03
−34	0,9999	1,465	1,159	63,15	390,41
−32	1,105	1,470	1,056	65,28	391,17
−30	1,219	1,476	0,963	67,42	391,91
−28	1,342	1,481	0,880	69,56	392,54
−26	1,475	1,487	0,806	71,71	393,36
−24	1,619	1,492	0,739	73,86	394,07
−22	1,774	1,498	0,678	76,01	394,77
−20	1,940	1,504	0,624	78,17	395,46
−18	2,117	1,510	0,574	80,33	396,13
−16	2,309	1,516	0,530	82,50	396,79
−15	2,410	1,518	0,509	83,59	397,12
−14	2,514	1,522	0,489	84,68	397,44
−12	2,732	1,528	0,452	86,85	398,06
−10	2,966	1,534	0,418	89,03	398,67
− 8	3,216	1,540	0,388	91,81	399,27
− 6	3,481	1,546	0,360	93,40	399,85
− 4	3,761	1,553	0,334	95,59	400,42
− 2	4,060	1,559	0,311	97,79	400,98
0	4,379	1,566	0,290	100,00	401,52
+ 5	5,259	1,583	0,244	105,54	402,80
+10	6,271	1,601	0,206	111,11	403,95
+15	7,427	1,619	0,175	116,72	404,99
+20	8,741	1,639	0,150	122,38	405,93
+25	10,225	1,659	0,128	128,09	406,75
+26	10,544	1,663	0,124	129,24	406,89
+28	11,204	1,671	0,117	131,54	407,17
+30	11,895	1,680	0,111	133,84	407,43
+32	12,617	1,689	0,105	136,16	407,67
+34	13,374	1,698	0,099	138,48	407,88
+36	14,165	1,707	0,093	140,82	408,06
+38	14,990	1,716	0,088	143,16	408,23
+40	15,850	1,726	0,083	145,52	408,37
+45	18,165	1,750	0,073	151,43	408,61
+50	20,727	1,777	0,063	157,40	408,69

Недостатки SO_2: ядовитость, корродирующее действие на сталь и реакции со смазочным маслом.

Содержание воды в жидком сернистом ангидриде, предназначенном для заполнения холодильной машины, не должно превышать 0,002% по весу.

Сернистый ангидрид (табл. 20) применим в качестве холодильного агента лишь в герметических машинах.

Таблица 20

Свойства насыщенных паров сернистого ангидрида [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $л/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−50	0,118	0,642	2,491	83,69	184,91
−40	0,220	0,652	1,387	87,00	186,21
−30	0,388	0,663	0,818	90,27	187,47
−20	0,648	0,674	0,507	93,53	188,70
−10	1,034	0,686	0,328	96,76	189,89
0	1,585	0,697	0,220	100,00	191,02
+10	2,347	0,710	0,152	103,23	192,09
+20	3,370	0,723	0,103	106,45	193,10
+30	4,710	0,738	0,079	109,65	194,04
+40	6,427	0,754	0,059	112,83	194,92
+50	8,583	0,772	0,045	116,01	195,72

Фреоны. *Общие сведения о фреонах.* *Фреонами* называются галоидные (содержащие фтор и хлор) производные насыщенных углеводородов. В качестве холодильных агентов используются галоидные производные метана и этана. Нормальная температура кипения фреона повышается с усложнением его молекулы при замене атома фтора атомом хлора.

Достоинства фреонов: высокий молекулярный вес, благоприятный для применения в турбокомпрессорах, низкое значение показателя адиабаты k и низкие температуры в конце сжатия, низкие температуры затвердевания, хорошая смачиваемость металлов.

Недостатки фреонов: малая холодопроизводительность 1 $кГ$ агента, большой объем циркулирующего агента, высокий удельный вес и большие дроссельные потери, низкие коэффициенты теплоотдачи, высокая стоимость, способность к разложению при соприкосновении с пламенем и к образованию в присутствии воды хлористого и фтористого водорода и фосгена.

Фреон-11 ($CFCl_3$). Область применения — турбокомпрессорные агрегаты для умеренных температур, главным образом для кондиционирования воздуха (табл. 21).

Таблица 21

Свойства насыщенных паров фреона-11 [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $л/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−40	0,0520	0,617	2,760	92,08	140,68
−30	0,0935	0,625	1,592	94,04	141,86
−20	0,160	0,634	0,966	96,01	143,66
−10	0,262	0,643	0,612	97,99	144,27
0	0,410	0,652	0,405	100,00	145,48
+10	0,619	0,662	0,275	102,03	146,69
+20	0,905	0,672	0,194	104,07	147,89
+30	1,285	0,683	0,140	106,14	149,09
+40	1,780	0,695	0,103	108,23	150,27
+50	2,412	0,707	0,078	110,36	151,43

Фреон-12 (CF_2Cl_2) — один из основных холодильных агентов для поршневых компрессоров всех производительностей (для умеренных температур кипения), главным образом для установок кондиционирования воздуха. Фреон-12 применяется с успехом в поршневых компрессорах до температур кипения — 70° С и в турбокомпрессорах (до более низких температур).

Специфические достоинства фреона-12 (табл. 22): умеренные давления в системе, низкие температуры в конце сжатия, химическая инертность, отсутствие слоя масла на теплопередающих поверхностях аппаратов.

Фреон-13 (CF_3Cl). Область применения — низкотемпературные каскадные холодильные машины с температурами кипения порядка — 70° до — 100° С (табл. 23).

Специфическое достоинство фреона-13: малые объемы пара при низких температурах.

Специфические недостатки фреона-13: низкая критическая температура, высокие давления при умеренных температурах.

Фреон-22 (CHF_2Cl). Область применения — низкотемпературные многоступенчатые (некаскадные) холодильные машины с поршневыми компрессорами и турбокомпрессорами. Фреон-22

Таблица 22

Свойства насыщенных паров фреона-12 [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $м^3/кГ$	Удельный объем: пара v'' $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−80	0,0635	0,615	2,124	83,41	127,61
−78	0,0733	0,617	1,859	83,81	127,84
−76	0,0842	0,619	1,632	84,22	128,08
−74	0,0966	0,621	1,438	84,62	128,32
−72	0,110	0,623	1,270	85,03	128,56
−70	0,125	0,625	1,125	85,42	128,79
−68	0,142	0,628	1,000	85,83	129,03
−66	0,162	0,630	0,890	86,23	129,27
−64	0,182	0,632	0,795	86,64	129,51
−62	0,205	0,634	0,712	87,05	129,75
−60	0,231	0,636	0,639	87,45	129,99
−58	0,259	0,639	0,575	87,86	130,23
−56	0,290	0,641	0,519	88,26	130,46
−54	0,323	0,643	0,469	88,66	130,70
−52	0,360	0,646	0,424	89,07	130,94
−50	0,399	0,648	0,385	89,48	131,18
−48	0,445	0,650	0,348	89,89	131,42
−46	0,490	0,653	0,319	90,30	131,66
−44	0,549	0,655	0,291	90,71	131,90
−42	0,596	0,658	0,266	91,12	132,14
−40	0,655	0,660	0,244	91,55	132,38
−38	0,719	0,662	0,224	91,95	132,62
−36	0,788	0,665	0,206	92,36	132,86
−35	0,824	0,666	0,197	92,56	132,98
−34	0,861	0,667	0,189	92,77	133,10
−32	0,940	0,670	0,175	93,18	133,34
−30	1,025	0,673	0,163	93,58	133,57
−28	1,115	0,675	0,149	93,99	133,80
−26	1,212	0,678	0,138	94,41	134,04
−24	1,315	0,681	0,128	94,82	134,28
−22	1,424	0,684	0,119	95,24	134,51
−20	1,540	0,686	0,111	95,67	134,74
−18	1,664	0,689	0,103	96,09	134,97
−16	1,795	0,692	0,096	96,51	135,20
−15	1,863	0,694	0,0927	95,72	135,32
−14	1,934	0,695	0,0895	96,94	135,43
−12	2,081	0,698	0,0836	97,37	135,66
−10	2,236	0,701	0,0781	97,81	135,89
− 8	2,400	0,704	0,0731	98,24	136,12
− 6	2,573	0,708	0,0684	98,68	136,34
− 4	2,755	0,711	0,0642	99,11	136,57
− 2	2,947	0,714	0,0602	99,55	136,79
0	3,149	0,717	0,0566	100,00	137,01
+ 2	3,361	0,721	0,0533	100,45	137,23
+ 4	3,583	0,724	0,0501	100,90	137,45
+ 5	3,699	0,726	0,0486	101,12	137,56
+10	4,318	0,735	0,0420	102,26	138,09
+15	5,012	0,744	0,0365	103,40	138,62
+20	5,785	0,753	0,0317	104,56	139,12
+25	6,644	0,764	0,0277	105,75	139,61
+26	6,826	0,766	0,0270	105,99	139,71
+28	7,202	0,770	0,0256	106,47	139,90
+30	7,592	0,774	0,0243	106,95	140,09
+32	7,999	0,779	0,0231	107,44	140,27
+34	8,420	0,783	0,0219	107,93	140,45
+36	8,858	0,788	0,0208	108,42	140,63
+38	9,313	0,793	0,0198	108,92	140,80
+40	9,784	0,798	0,0188	109,41	140,97
+45	11,038	0,810	0,0166	110,66	141,36
+50	12,405	0,824	0,0146	111,92	141,71

Таблица 23

Свойства насыщенных паров фреона-13 [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $м^3/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Теплота парообразования r в $ккал/кГ$
−140	0,0087	0,576	12,38	41,4
−130	0,0271	0,587	4,27	40,6
−120	0,0714	0,599	1,73	39,8
−110	0,164	0,612	0,798	38,8
−100	0,339	0,626	0,407	37,8
− 90	0,640	0,642	0,225	36,8
− 80	1,12	0,658	0,134	35,6
− 70	1,84	0,675	0,0844	34,4
− 60	2,87	0,695	0,0555	33,1
− 50	4,29	0,717	0,0379	31,7
− 40	6,17	0,741	0,0264	30,0
− 30	8,59	0,769	0,0189	28,2
− 20	11,66	0,802	0,0137	26,2
− 10	15,45	0,842	0,0101	25,9
0	20,1	0,894	0,00749	21,5
+ 10	25,7	0,962	0,00547	18,4
+ 20	32,4	1,08	0,00383	13,8
+ 25	36,2	1,19	0,00302	10,2
+ 28,8 (критич.)	39,4	1,72	0,00172	0,0

с успехом применяется и для умеренных температур (табл. 24).

Таблица 24

Свойства насыщенных паров фреона-22 [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $м^3/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−100	0,0205	0,643	8,33	74,17	137,93
− 90	0,0489	0,651	3,63	76,64	139,10
− 80	0,106	0,661	1,79	79,14	140,28
− 70	0,209	0,671	0,941	81,64	141,48
− 60	0,382	0,682	0,534	84,15	142,69
− 50	0,660	0,695	0,323	86,68	143,89
− 40	1,076	0,709	0,205	89,27	145,08
− 30	1,68	0,724	0,135	91,91	146,24
− 20	2,51	0,740	0,093	94,57	147,37
− 10	3,63	0,759	0,065	97,24	148,43
0	5,10	0,779	0,0471	100,00	149,45
+ 10	6,99	0,800	0,0346	103,01	150,37
+ 20	9,35	0,824	0,0258	106,13	151,13
+ 30	12,27	0,851	0,0194	109,42	151,75
+ 40	15,79	0,883	0,0148	112,78	152,13
+ 50	19,99	0,922	0,0113	116,24	152,37

Таблица 25

Термодинамические свойства жидкого фреона-113 [28]

t° C	$p = 5$ ата				$p = 15$ ата				$p = 25$ ата				$p = 35$ ата			
	c_p ккал/кГ·град	$\frac{\gamma}{\Gamma}$ кГ·сек²/м⁴	i ккал/кГ	s ккал/кГ·град	c_p ккал/кГ·град	$\frac{\gamma}{\Gamma}$ кГ·сек²/м⁴	i ккал/кГ	s ккал/кГ·град	c_p ккал/кГ·град	$\frac{\gamma}{\Gamma}$ кГ·сек²/м⁴	i ккал/кГ	s ккал/кГ·град	c_p ккал/кГ·град	$\frac{\gamma}{\Gamma}$ кГ·сек²/м⁴	i ккал/кГ	s ккал/кГ·град
— 20	0,216	—	95,66	0,9833	0,215	—	95,79	0,9833	0,214	—	95,95	0,9832	0,213	—	96,07	0,9832
0	0,221	—	100,09	0,9999	0,219	—	100,17	0,9998	0,218	—	100,27	0,9997	0,217	—	100,37	0,9995
+ 40	0,230	1,535	109,10	1,0306	0,228	1,537	109,12	1,0303	0,225	1,539	109,14	1,0300	0,223	1,542	109,16	1,0296
+ 80	0,243	1,432	118,55	1,0590	0,233	1,436	118,42	1,0582	0,233	1,439	118,33	1,0575	0,230	1,444	118,22	1,0569
+120	—	—	—	—	0,253	1,318	128,20	1,0843	0,247	1,325	127,94	1,0832	0,241	1,333	127,65	1,0822
+160	—	—	—	—	—	—	—	—	0,274	1,181	138,31	1,1083	0,263	1,195	137,68	1,1065
+180	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,281	1,103	143,07	1,1188

Специфические достоинства фреона-22: низкая нормальная температура кипения (— 40,8° С), пологий характер кривой давления, относительно малый объем циркулирующей жидкости. Содержание воды во фреоне-22 не должно превышать 0,0025%.

Фреон-113 ($CF_2Cl \cdot CFCl_2$ или $C_2F_3Cl_3$). Область применения — турбокомпрессорные холодильные установки для высоких температур (кондиционирование воздуха). Термодинамические свойства фреона-113 приведены в табл. 25.

Специфические достоинства фреона-113 (табл. 26): высокий молекулярный вес, удобство хранения и транспортировки (в железных бочках).

Таблица 26

Свойства насыщенных паров фреона-113 [28]

Температура t в °С	Давление p в кГ/см²	Удельный объем		Энтальпия в ккал/кГ	
		жидкости v' в л/кГ	пара v'' в м³/кГ	жидкости i'	пара i''
—30	0,028	0,594	3,910	93,93	134,04
—20	0,052	0,601	2,204	95,93	135,46
—10	0,090	0,609	1,309	97,96	136,89
0	0,151	0,617	0,813	100,00	138,33
+10	0,241	0,626	0,526	102,08	139,79
+20	0,371	0,634	0,362	104,20	141,25
+30	0,552	0,644	0,243	106,36	142,72
+40	0,798	0,654	0,172	108,56	144,20
+50	1,122	0,665	0,125	110,80	145,68
+60	1,542	0,676	0,0931	113,09	147,15
+70	2,073	0,688	0,0704	115,43	148,62
+80	2,738	0,701	0,0513	117,82	150,07
+90	3,545	0,715	0,0423	120,26	151,51
+100	4,514	0,730	0,0334	122,58	152,94

Недостаток фреона-113 — вакуум в системе холодильной машины.

Уравнение состояния для области перегретого пара фреона-113

$$v = 4{,}525\,\frac{T}{p} - \frac{0{,}1057}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2{,}5}}\ м^3/кГ,$$

где p — давление в $кГ/м^2$.

Углеводороды. Область применения углеводородов в качестве холодильных агентов — низкотемпературные установки (при отсутствии требуемых фреонов), установки в тех областях

промышленности, где соответствующие углеводороды являются сырьем, фабрикатом или отходами.

В качестве холодильных агентов применяются углеводороды (табл. 27, 28, 29, 30): метан (CH_4), этилен (C_2H_4), этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), пропилен (C_3H_6), бутан и изобутан (C_4H_{10}).

Таблица 27

Свойства насыщенных паров метана [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $м^3/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−173,1	—	—	—	0,00	127,33
−170	0,45	2,30	—	2,56	128,62
−160	1,20	2,37	0,480	10,83	132,83
−150	2,49	2,46	0,251	19,22	137,11
−140	4,54	2,56	0,144	27,89	141,22
−130	8,02	2,68	0,0887	36,89	144,95
−120	12,64	2,82	0,0562	46,39	147,89
−110	18,63	3,02	0,0377	56,56	149,62
−100	24,37	3,27	0,0244	68,00	149,56
− 90	37,89	3,88	0,0127	82,17	144,73
−82,0 (критич.)	47,3	6,17	0,00617	114,33	114,33

Таблица 28

Свойства насыщенных паров этилена [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $м^3/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−116	0,475	1,71	1,004	18,33	137,27
−110	0,703	1,73	0,693	21,28	138,22
−100	1,277	1,78	0,378	26,39	139,83
− 90	2,17	1,82	0,233	31,72	141,56
− 80	3,47	1,87	0,150	37,33	143,50
− 70	5,28	1,93	0,101	43,22	145,39
− 60	7,71	2,00	0,0712	49,39	147,28
− 50	10,84	2,08	0,0516	56,00	149,17
− 40	14,79	2,16	0,0378	63,00	150,00
− 30	19,69	2,27	0,0277	70,50	150,22
− 20	25,70	2,41	0,0202	78,78	149,06
− 10	32,95	2,60	0,0146	88,33	147,44
0	41,71	2,90	0,0100	100,00	143,9
+9,36 (критич.	51,45	4,63	0,00463	126,1	126,1

Достоинства углеводородов: доступность и невысокая стоимость, низкие температуры затвердевания.

Таблица 29

Свойства насыщенных паров этана [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $м^3/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−100	0,535	1,789	0,889	35,52	155,07
− 95	0,723	1,808	0,673	38,42	156,39
− 90	0,960	1,825	0,518	41,37	157,69
− 85	1,25	1,844	0,405	44,33	158,96
− 80	1,61	1,863	0,321	47,25	160,19
− 75	2,04	1,884	0,257	50,21	161,39
− 70	2,55	1,905	0,208	53,17	162,56
− 65	3,15	1,927	0,171	56,12	163,68
− 60	3,86	1,951	0,141	59,11	164,76
− 55	4,68	1,976	0,117	62,12	165,79
− 50	5,63	2,00	0,0983	65,08	166,76
− 40	7,93	2,06	0,0705	71,30	168,54
− 30	10,86	2,13	0,0515	77,93	170,05
− 20	14,51	2,21	0,0383	84,88	171,20
− 10	18,96	2,30	0,0288	92,27	172,06
0	24,3	2,43	0,0217	100,00	172,44
+ 10	30,7	2,59	0,0161	108,45	171,55
+ 20	38,5	2,86	0,0114	118,20	168,41
+ 30	48,0	3,49	0,00706	132,09	159,71
+32,1 (критич.)	50,3	4,70	0,00470	145,75	145,75

Таблица 30

Свойства насыщенных паров пропана [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $м^3/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−50	0,714	1,69	0,584	72,68	176,28
−45	0,909	1,71	0,480	75,26	177,53
−40	1,14	1,72	0,394	77,86	178,78
−35	1,40	1,74	0,323	80,49	180,03
−30	1,71	1,76	0,266	83,16	181,28
−25	2,07	1,78	0,221	85,86	182,58
−20	2,49	1,80	0,185	88,60	183,93
−15	2,97	1,82	0,156	91,39	185,29
−10	3,52	1,84	0,132	94,22	186,71
− 5	4,14	1,86	0,113	97,08	188,17
0	4,84	1,89	0,097	100,00	189,67
+ 5	5,60	1,91	0,0843	102,96	191,17
+10	6,44	1,94	0,0726	105,96	192,67
+15	7,37	1,96	0,0637	109,01	194,17
+20	8,41	1,99	0,0564	112,10	195,64
+25	9,64	2,02	0,0502	115,24	197,04
+30	10,98	2,05	0,0448	118,42	198,44
+35	12,42	2,08	0,0397	121,64	199,75
+40	13,95	2,10	0,0348	124,90	200,89
+45	15,60	2,12	0,0309	128,20	201,92
+50	17,40	2,15	0,0270	131,55	202,52

Недостатки углеводородов: воспламеняемость и образование взрывчатых смесей с воздухом, низкие значения критических температур, смешиваемость со смазочным маслом, малый молекулярный вес. Это допускает применение углеводородов лишь в установках большой холодопроизводительности.

В табл. 27 энтальпия жидкости принята равной нулю при 100° К.

Углекислота (CO_2) обычно применяется в судовых холодильных машинах, где требуется безвредный холодильный агент (табл. 31).

Таблица 31

Свойства насыщенных паров углекислоты [28]

Температура t в °С	Давление p в $кГ/см^2$	Удельный объем: жидкости v' в $л/кГ$	Удельный объем: пара v'' в $м^3/кГ$	Энтальпия в $ккал/кГ$: жидкости i'	Энтальпия в $ккал/кГ$: пара i''
−50	6,97	0,867	0,0554	75,01	155,57
−40	10,25	0,897	0,0382	79,59	156,17
−30	14,55	0,931	0,0270	84,19	156,56
−20	20,06	0,971	0,0195	88,93	156,72
−10	26,99	1,02	0,0142	94,09	156,60
0	35,54	1,08	0,0104	100,00	156,13
+10	45,95	1,17	0,00752	106,50	154,59
+20	58,46	1,30	0,00529	114,00	151,10
+30	73,34	1,63	0,00300	125,90	140,95
+31	74,96	2,16	0,00216	133,50	133,50

Недостатки углекислоты как холодильного агента: высокие давления, низкая критическая точка, относительно высокая температура затвердевания.

Вода. Область применения воды в качестве холодильного агента — пароэжекторные машины.

Достоинства воды как холодильного агента — доступность и дешевизна.

Недостатки воды как агента: низкие давления в испарителе, ограниченный диапазон получаемых температур (не ниже $+2 \div +4$° С), содержание растворенных солей и воздуха, выделяющихся в испарителе.

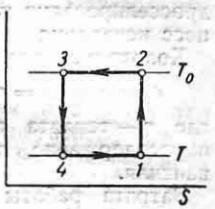
ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Холодильные машины применяются для понижения температуры охлаждаемого объекта ниже температуры окружающей среды. Отводимое при охлаждении тепло воспринимается холодильным агентом, температура которого должна быть еще более низкой, или промежуточным теплоносителем.

Поддержание пониженной температуры агента осуществляется обычно испарением (кипением) его при соответствующем давлении с непрерывным удалением образующихся паров.

Процесс переноса тепла q_0 ($ккал/кГ$) от охлаждаемой среды к охлаждающей среде связан с затратой работы Al ($ккал/кГ$) для сжатия паров.

В холодильных машинах, как правило, осуществляется замкнутый цикл изменения состояния агента и возвращение его в начальное состояние. Цикл холодильной машины осуществляется всегда против часовой стрелки, т. е. является „обратным" в отношении циклов двигателей.

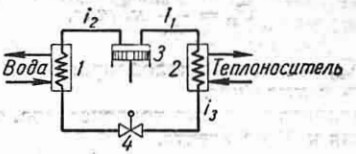


Фиг. 63. Цикл холодильной машины.

Теоретический цикл холодильной машины представляет собой обратный цикл Карно (фиг. 63).

В зависимости от способа осуществления замкнутого цикла холодильные машины подразделяются на компрессионные, пароэжекторные и абсорбционные.

Компрессионные холодильные машины. Схема машины показана на фиг. 64: испаритель *2*, в котором происходит поглощение тепла агентом при переходе его из жидкого состояния

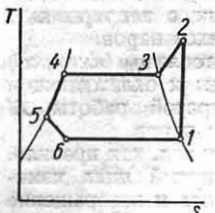


Фиг. 64. Схема компрессионной холодильной машины.

в парообразное; компрессор *3*, сжимающий пары агента до давления конденсации; конденсатор *1*, в котором холодильный агент сжижается, отдавая тепло окружающей среде; регулирующий вентиль *4*, в котором жидкий агент дросселируется до давления кипения.

Теоретические циклы компрессионных машин рассчитывают исходя из следующих предположений: процессы кипения и конденсации протекают при неизменных давлениях и температурах; компрессор — идеальный; сжатие — адиабатическое; понижение давления агента,

поступающего из конденсатора в испаритель, происходит в дроссельном (регулирующем) вентиле; в трубопроводах состояние агента не изменяется. Этот цикл показан на фиг. 65, где *1—2* — сжатие в компрессоре; *2—3* — отнятие в конденсаторе тепла перегрева; *3—4* — сжижение в конденсаторе; *4—5* — переохлаждение в конденсаторе; *5—6* — процесс дросселирования или мятия; *6—1* — процесс испарения или кипения.



Фиг. 65. Цикл компрессионной холодильной машины.

Холодопроизводительность 1 *кГ* агента

$$q_0 = i_1 - i_3 = r\,(1 - x)\ \ккал/кГ,$$

где r — теплота парообразования; x — паросодержание после регулирующего вентиля.

Затрата работы в компрессоре при сжатии 1 *кГ* агента

$$Al = i_2 - i_1\ \ккал/кГ.$$

Объемная холодопроизводительность 1 $м^3$ агента, поступающего в компрессор,

$$q_v = \frac{q_0}{v_1} = \frac{i_1 - i_3}{v_1}\ \ккал/м^3,$$

где v_1 — удельный объем пара, засасываемого компрессором, в $м^3/кГ$.

Количество циркулирующего агента

$$G_a = \frac{Q_0}{q_0}\ кГ/час,$$

где Q_0 — заданная холодопроизводительность в *ккал/час*.

Тепловая нагрузка конденсатора, отнесенная к 1 *кГ* агента,

$$q_к = q_0 + Al = i_2 - i_3\ \ккал/кГ.$$

Необходимый объем, описываемый поршнем компрессора,

$$V_h = \frac{Q_0}{q_v} = G_a v_1\ м^3/час.$$

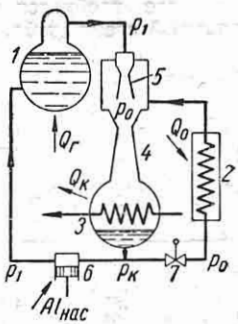
Мощность, подводимая к компрессору (индикаторная),

$$N_i = \frac{G_a Al}{860}\ квт.$$

Удельная холодопроизводительность (индикаторная)

$$K = \frac{Q_0}{N_i}\ \ккал/квт\text{-}ч.$$

Пароэжекторные холодильные машины. Пароэжекторные машины включают следующие элементы: испаритель *2*, в котором агент (вода или рассол), частично испаряясь, охлаждается; паровой эжектор *5*, в котором за счет кинетической энергии струи рабочего пара, поступающего из котла *1*, осуществляются засасывание холодного пара из испарителя и сжатие смеси рабочего и холодного пара в диффузоре *4* до давления в конденсаторе; конденсатор *3*, в котором пар сжижается, отдавая тепло охлаждающей воде; насос *6*; регулирующий вентиль *7* и вспомогательные устройства (фиг. 66).



Фиг. 66. Схема пароэжекторной холодильной машины.

Теоретический цикл пароэжекторной машины, питающейся рабочим паром из котла, характеризуется: адиабатическим расширением сухого насыщенного (рабочего) пара в сопле эжектора — от давления в котле p_1 до давления кипения p_0; смешиванием рабочего пара с сухим насыщенным холодным паром под давлением p_0; адиабатическим сжатием смеси в диффузоре до давления конденсации $p_к$; дросселированием части конденсата в регулирующем вентиле; сжатием остальной части конденсата насосом до давления p_1. Расчет цикла производится для 1 *кГ* воды, испаряющейся в испарителе, при затрате a *кГ* рабочего пара.

Область применения пароэжекторных машин — получение температур не ниже 0° С (при охлаждении воды) и не ниже — 10° С (при охлаждении рассола).

Тепловой баланс цикла

$$Q_к = Q_0 + Q_г + Al_{нас}\ \ккал/час.$$

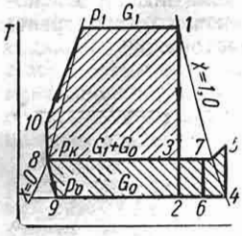
Холодильный коэффициент цикла

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{Q_г + Al_{нас}}.$$

Холодопроизводительность 1 *кГ* холодного пара $q_0^* = i_4 - i_8$ *ккал/кГ* (фиг. 67).

* Цифровые индексы у энтальпий здесь и дальше относятся к точкам на диаграмме $T - s$ (фиг. 67).

Тепловая нагрузка конденсатора, отнесенная к 1 *кГ* холодного пара,



Фиг. 67. Цикл пароэжекторной машины.

$$q_к = (i_5 - i_8) + a(i_3 - i_8) = (1+a)\times(i_7 - i_8) \text{ ккал/кГ}.$$

Необходимое количество рабочего пара (на 1 *кГ* холодного пара)

$$a = \frac{i_5 - i_4}{(i_1 - i_3) - (i_{10} - i_8)} \text{ кГ/кГ}.$$

Часовое количество рабочего пара

$$G_1 = aG_0 = a\frac{Q_0}{q_0} \text{ кГ/час},$$

где Q_0 — заданная холодопроизводительность в *ккал/час*; G_0 — часовое количество холодного пара в *кГ/час*.

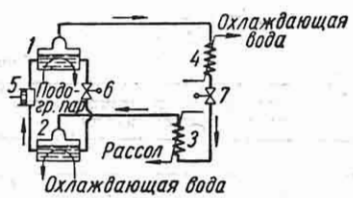
Удельная холодопроизводительность

$$k = \frac{Q_0}{G_1} \text{ ккал/кГ рабочего пара.}$$

Абсорбционные холодильные машины. Различают непрерывно и периодически действующие абсорбционные машины.

Схема абсорбционной непрерывно действующей машины изображена на фиг. 68.

Перенос паров агента из испарителя в конденсатор производится при помощи растворителя (абсорбента), циркулирующего из абсорбера в генератор. Крепкий



Фиг. 68. Схема абсорбционной холодильной машины.

раствор подается насосом в обогреваемый генератор, где он кипит под давлением $p_к$. Пары агента с малой примесью пара растворителя направляются в конденсатор. Сконденсированный агент подается из конденсатора через регулирующий вентиль в испаритель, где кипит под давлением p_0. Горячий слабый раствор через дроссельный вентиль возвращается в абсорбер, где поглощает пары агента, отходящего из испарителя.

Механическая энергия в абсорбционных машинах затрачивается лишь на привод насоса.

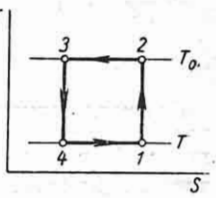
Теоретические циклы одноступенчатых абсорбционных машин рассчитывают исходя из предпосылки, что давление в испарителе p_0 равно давлению в абсорбере, а давление в генераторе $p_к$ — давлению в конденсаторе.

Тепловой расчет абсорбционных машин обычно производится графическим методом при помощи i — ξ-диаграммы.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС

Тепловой насос, как и холодильная машина, работает по обратному циклу, т. е. за счет затраты работы забирает тепло у источника тепла низкой температуры и сообщает тепло источнику высокой температуры.

Тепловой насос предназначается для нагревания объекта за счет затраты работы (например, для отопления помещений). Источником тепла низкой температуры для теплового насоса служит окружающая среда.



Фиг. 69. Цикл теплового насоса.

Экономичность работы теплового насоса характеризуется коэффициентом

$$k_{т.н} = \frac{Q_1}{AL},$$

где Q_1 — количество тепла, сообщаемое источнику высокой температуры, AL — затрачиваемая работа.

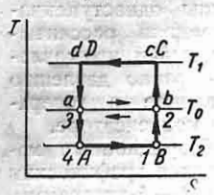
Теоретический цикл теплового насоса представляет собой обратный цикл Карно (фиг. 69).

ЦИКЛЫ ДЛЯ СОВМЕСТНОГО ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛА И ХОЛОДА

Иногда возникает надобность в одновременном получении тепла и холода. Это достигается в установках, цикл работы которых является совмещением цикла теплового насоса и холодильной машины.

Такой общий совмещенный цикл представлен на фиг. 70, где *1—2—3—4—1* — цикл холодильной машины, и *a — b — c — d — a* — цикл теплового насоса.

Этот совмещенный цикл, не обладая термодинамическими преимуществами, имеет ряд технических и технико-экономических преимуществ. Тепло и „холод", полученные в этом цикле, связаны определенным соотношением



Фиг. 70. Совмещенный цикл холодильной машины и теплового насоса.

$$q_0 = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} q_1,$$

где q_0 — тепло, отбираемое от охлаждаемого помещения; q_1 — тепло, отдаваемое для нужд отопления; ε — холодильный коэффициент совмещенного цикла.

В случае цикла Карно

$$\varepsilon_K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Для неизотермического процесса подвода и отвода тепла в формулу для ε вместо T_2 и T_1 надо подставлять среднепланиметрические температуры T_2^{cp} и T_1^{cp}.

Коэффициент эффективности совмещенного цикла определяется соотношением

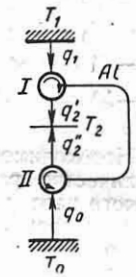
$$k_c = 1 + 2\varepsilon = \frac{T_1^{cp} + T_2^{cp}}{T_1^{cp} - T_2^{cp}}.$$

ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРЫ

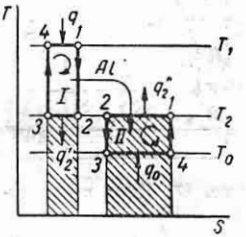
Устройство, позволяющее обратимым путем передать тепло от источника с одной температурой к источнику с другой температурой, получило название термотрансформатора.

Термотрансформатор называется понижающим (табл. 32), если он предназначен для получения тепла при более низкой температуре, чем исходная, и повышающим, если он предназначен для получения тепла при более высокой температуре, чем исходная. Возможно получение тепла одновременно при более низкой и более высокой температурах, чем исходная, в термотрансформаторах смешанного типа.

На фиг. 71 и 72 даны схемы и цикл для понижающего термотрансформатора, а на фиг. 73 и 74 схема и цикл для повышающего термотрансформатора.

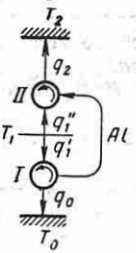


Фиг. 71. Энергетическая схема понижающего термотрансформатора.

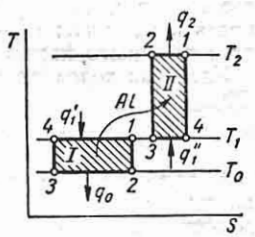


Фиг. 72. Цикл понижающего термотрансформатора.

Одной из основных характеристик термотрансформатора является коэффициент преобразования ψ, который показывает,



Фиг. 73. Энергетическая схема повышающего термотрансформатора.



Фиг. 74. Цикл повышающего термотрансформатора.

скольким единицам тепла при заданной температуре T_2 соответствует единица тепла при некоторой температуре T_1:

$$\psi_{1-2} = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0}.$$

Таблица 32

Теоретические значения коэффициентов преобразования понижающего термотрансформатора [3]

t_0 в °C	t_1 в °C				t_2 в °C
	200	400	600	1000	
0	2,35	3,34	3,81	4,35	60
—10	2,11	2,78	3,32	3,78	
—20	1,94	2,58	2,95	3,33	
0	2,73	3,90	4,45	5,10	50
—10	2,41	3,27	3,76	4,26	
—20	2,16	2,88	3,26	3,71	

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Влажный воздух — смесь сухого (не содержащего молекул H_2O) воздуха и водяного пара. Смесь сухого воздуха с перегретым водяным паром называется ненасыщенным влажным воздухом, а с насыщенным водяным паром — насыщенным влажным воздухом.

В более общем, но относительно редком случае смесь может состоять из сухого воздуха, насыщенного водяного пара, жидкой воды и ледяной пыли.

Ввиду того что подавляющее большинство расчетов, связанных с влажным воздухом, производится для давлений, близких к атмосферному, парциальное давление водяного пара невелико, и он с достаточной степенью точности (максимальная погрешность 2%) может рассматриваться как идеальный газ. При более точных расчетах учет отклонения водяного пара от идеального газа производится по табл. 33—36 и $i-d$-диаграмме.

Обычно количество сухого воздуха в процессах, связанных с влажным воздухом, остается неизменным, поэтому для удобства расчетов все параметры влажного воздуха отнесены к 1 $\kappa Г$ сухого воздуха.

Определение основных величин (табл. 33 и 34). Весовым влагосодержанием влажного воздуха $d\left[\frac{Г\,H_2O}{\kappa Г\text{ сух. возд.}}\right]$ называется отношение содержащейся во влажном воздухе влаги W $Г$ к весу сухого воздуха L $\kappa Г$:

$$d=\frac{W}{L}.$$

Таблица 33

Удельные веса водяного пара во влажном воздухе (B = 745 *мм* рт. ст.) [3]

$t°$ C	φ в %									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
0	4,847	4,362	3,878	3,393	2,908	2,423	1,939	1,454	0,9694	0,4847
10	9,398	8,458	7,518	6,579	5,639	4,699	3,759	2,819	1,880	0,9398
20	17,29	15,56	13,83	12,10	10,37	8,645	6,916	5,187	3,458	1,729
30	30,37	27,33	24,30	21,26	18,22	15,19	12,15	9,111	6,074	3,037
40	51,15	46,03	40,92	35,80	30,69	25,57	20,46	15,34	10,23	5,115
50	83,06	74,75	66,45	58,14	49,84	41,53	33,22	24,92	16,61	8,306
60	130,2	117,2	104,2	91,14	78,12	65,10	52,08	39,06	26,04	13,02
70	198,2	178,4	158,6	138,7	118,9	99,10	79,28	59,46	39,64	19,82
80	293,4	264,1	234,7	205,4	176,0	146,7	117,4	88,02	58,68	29,34
90	423,5	381,2	338,8	296,5	254,1	211,8	169,4	127,1	84,70	42,35
100	584,8	526,3	467,8	409,4	350,9	292,4	233,9	175,4	117,0	58,48
110	568,2	511,4	454,6	397,7	340,9	284,1	227,3	170,5	113,6	56,82
120	553,1	497,8	442,5	387,2	331,9	276,6	221,2	165,9	110,6	55,31
130	538,8	484,9	431,0	377,2	323,3	269,4	215,5	161,6	107,8	53,88
140	525,2	472,7	420,2	367,6	315,1	262,6	210,1	157,6	105,0	52,52
150	512,3	461,1	409,8	358,6	307,4	256,2	204,9	153,7	102,5	51,23
160	500,0	450,0	400,0	350,0	300,0	250,0	200,0	150,0	100,0	50,00
170	488,5	439,7	390,8	342,0	293,1	244,3	195,4	146,6	97,70	48,85
180	477,6	429,8	382,1	334,3	286,6	238,8	191,0	143,8	95,52	47,76
190	467,1	420,4	373,7	327,0	280,3	233,6	186,8	140,1	93,42	46,71
200	457,0	411,3	365,6	319,9	274,2	228,5	182,8	137,1	91,70	45,70
250	412,5	371,3	330,0	288,8	247,5	206,3	165,0	123,8	82,50	41,25
300	376,1	338,5	300,9	263,3	225,7	188,1	150,4	112,8	75,22	37,61
350	345,7	311,1	276,6	242,0	207,4	172,9	138,3	103,7	69,14	34,57
400	319,9	287,9	255,9	223,9	191,9	160,0	128,0	95,97	63,98	31,99
450	297,4	267,9	238,2	208,4	178,6	148,9	119,1	89,31	59,54	29,77
500	278,7	250,6	222,7	194,9	167,0	139,2	111,4	83,52	55,68	27,84
550	261,4	235,3	209,1	183,0	156,8	130,7	104,6	78,42	52,28	26,14
600	246,5	221,9	197,2	172,6	147,9	123,3	98,60	73,95	49,30	24,65
650	233,2	209,9	186,6	163,2	139,9	116,6	93,28	69,96	46,64	23,32
700	221,2	199,1	177,0	154,8	132,7	110,6	88,48	66,36	44,24	22,12
750	210,4	189,4	168,3	147,3	126,2	105,2	84,16	63,12	42,08	21,04
800	200,6	180,5	160,5	140,4	120,4	100,3	80,24	60,18	40,12	20,06

Таблица 34

Энтальпия водяного пара во влажном воздухе i *ккал/кГ* [3]

$t°$ C	φ в %									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
0	597,25	597,26	597,26	597,27	597,27	597,27	597,28	597,28	597,29	597,29
10	601,68	601,69	601,69	601,70	601,70	601,71	601,72	601,73	601,73	601,74
20	606,06	606,08	606,09	606,10	606,11	606,12	606,14	606,15	606,16	606,18
30	610,42	610,44	610,46	610,48	610,51	610,53	610,55	610,57	610,59	610,61
40	614,72	614,76	614,79	614,83	614,86	614,90	614,93	614,96	614,99	615,03
50	618,98	619,04	619,09	619,14	619,18	619,24	619,29	619,33	619,38	619,44
60	623,17	623,25	623,33	623,40	623,48	623,55	623,62	623,70	623,77	623,84
70	627,28	627,39	627,49	627,60	627,70	627,81	627,91	628,02	628,12	628,23
80	631,29	631,43	631,58	631,73	631,87	632,01	632,17	632,32	632,47	632,61
90	635,17	635,37	635,57	635,78	635,98	636,18	636,37	636,58	636,78	636,98
100	638,95	639,21	639,48	639,75	640,01	640,27	640,55	640,81	641,07	641,34
110	643,68	643,93	644,18	644,42	644,66	644,91	645,15	645,40	645,64	645,88
120	648,43	648,66	648,88	649,10	649,33	649,55	649,78	650,00	650,22	650,44
130	653,16	653,37	653,58	653,79	653,99	654,19	654,40	654,60	654,80	655,01
140	657,88	658,07	658,27	658,46	658,64	658,83	659,02	659,21	659,40	659,58
150	662,61	662,78	662,95	663,13	663,30	663,47	663,65	663,82	663,99	664,17
160	667,33	667,49	667,65	667,81	667,97	668,13	668,29	668,45	668,61	668,77
170	672,04	672,19	672,34	672,49	672,64	672,79	672,94	673,09	673,23	673,38
180	676,76	676,90	677,04	677,18	677,31	677,45	677,59	677,73	677,86	678,00
190	681,48	681,61	681,74	681,87	682,00	682,13	682,26	682,38	682,51	682,64
200	686,21	686,33	686,45	686,57	686,69	686,81	686,93	687,05	687,17	687,29
250	709,96	710,04	710,13	710,22	710,30	710,39	710,47	710,56	710,65	710,74
300	733,95	734,02	734,08	734,15	734,21	734,28	734,34	734,41	734,47	734,54
350	758,25	758,30	758,35	758,40	758,45	758,50	758,55	758,60	758,65	758,70
400	782,91	782,95	782,99	783,03	783,07	783,10	783,14	783,18	783,22	783,26
450	807,92	807,96	807,99	808,02	808,05	808,08	808,11	808,15	808,18	808,21
500	833,32	833,35	833,37	833,40	833,43	833,45	833,48	833,50	833,53	833,56
550	859,14	859,16	859,17	859,18	859,20	859,22	859,24	859,27	859,29	859,31
600	885,32	885,34	885,36	885,38	885,39	885,41	885,43	885,45	885,46	885,48
650	911,93	911,94	911,96	911,98	911,99	912,00	912,02	912,03	912,05	912,07
700	938,96	938,97	938,98	939,00	939,01	939,02	939,04	939,05	939,06	939,08
750	966,41	966,42	966,43	966,44	966,45	966,46	966,47	966,49	966,50	966,51
800	994,27	994,28	994,29	994,30	994,31	994,32	994,33	994,34	994,35	994,36

Мольным влагосодержанием влажного воздуха $x\left[\frac{\text{молей } H_2O}{\text{моль сух. возд.}}\right]$ называется отношение количества молей водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, к количеству молей сухого воздуха

$$x = 0{,}00161d; \quad d = 622x.$$

Используя характеристическое уравнение идеального газа, можно выразить влагосодержание через соответствующие парциальные давления водяного пара $p_п$ и сухого воздуха $p_в$

$$d = 622\frac{p_п}{p_в} = 622\frac{p_п}{p - p_п};$$

$$x = \frac{p_п}{p_в} = \frac{p_п}{p - p_п},$$

где $p = p_п + p_в$ — давление влажного воздуха.

Максимально возможное значение влагосодержания влажного воздуха в случае, если температура влажного воздуха ниже температуры насыщения водяного пара при давлении смеси,

$$d_{max} = \frac{p_н}{p_в},$$

где $p_н$ — давление насыщения водяного пара при температуре смеси (см. таблицу насыщенного водяного пара); в случае, если температура влажного воздуха выше или равна температуре насыщения водяного пара при давлении смеси, наибольшее значение

$$d_{max} = \infty,$$

т. е. влажный воздух в этом случае состоит из одного водяного пара.

Относительной влажностью φ называется отношение удельного веса водяного пара во влажном воздухе ($\gamma_п$)

Таблица 35

Объем влажного воздуха на 1 *кГ* сухого воздуха; V_0 *м³/кГ*; B =745 *мм* рт. ст. [3]

$t°$ C	φ в %											
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5	0
−10	0,762	0,762	0,762	0,762	0,762	0,761	0,761	0,761	0,761	0,761	0,760	0,760
0	0,794	0,794	0,793	0,793	0,792	0,792	0,791	0,791	0,790	0,790	0,789	0,789
10	0,828	0,827	0,826	0,825	0,824	0,823	0,822	0,821	0,820	0,819	0,819	0,818
20	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,855	0,853	0,851	0,849	0,848	0,847
30	0,915	0,911	0,907	0,903	0,899	0,895	0,891	0,887	0,883	0,880	0,878	0,876
40	0,977	0,970	0,962	0,954	0,947	0,940	0,933	0,925	0,919	0,912	0,908	0,905
50	1,07	1,05	1,04	1,02	1,01	0,996	0,983	0,970	0,958	0,945	0,940	0,934
60	1,20	1,17	1,15	1,12	1,09	1,07	1,05	1,02	1,00	0,982	0,972	0,963
70	1,44	1,38	1,32	1,27	1,22	1,17	1,13	1,09	1,06	1,02	1,01	0,992
80	1,95	1,79	1,65	1,53	1,43	1,34	1,26	1,19	1,13	1,07	1,05	1,02
90	3,57	2,88	2,42	2,08	1,83	1,63	1,47	1,33	1,22	1,13	1,09	1,05
99,4	—	10,9	5,45	3,63	2,72	2,17	1,80	1,54	1,35	1,20	1,13	1,08
100	—	10,9	5,45	3,63	2,72	2,17	1,81	1,55	1,35	1,20	1,14	1,08
120	—	11,5	5,73	3,82	2,86	2,28	1,90	1,63	1,42	1,26	1,20	1,14
140	—	12,0	6,01	4,01	3,00	2,40	2,00	1,71	1,49	1,33	1,26	1,19
160	—	12,6	6,30	4,19	3,14	2,51	2,09	1,79	1,57	1,39	1,32	1,25
180	—	13,2	6,58	4,38	3,29	2,63	2,19	1,87	1,64	1,46	1,38	1,31
200	—	13,7	6,86	4,57	3,43	2,74	2,28	1,96	1,71	1,52	1,44	1,37
250	—	15,2	7,58	5,05	3,79	3,03	2,52	2,16	1,89	1,68	1,59	1,51
300	—	16,6	8,29	5,53	4,15	3,32	2,76	2,37	2,07	1,84	1,74	1,66
350	—	18,0	9,01	6,01	4,50	3,60	3,00	2,57	2,25	2,00	1,90	1,80
400	—	19,5	9,73	6,49	4,87	3,89	3,24	2,78	2,43	2,16	2,05	1,94
450	—	20,9	10,4	6,97	5,22	4,18	3,48	2,99	2,61	2,32	2,20	2,09
500	—	22,3	11,2	7,45	5,59	4,47	3,72	3,19	2,79	2,48	2,35	2,23
550	—	23,8	11,9	7,93	5,95	4,76	3,96	3,40	2,97	2,64	2,50	2,38
600	—	25,2	12,6	8,41	6,31	5,05	4,21	3,60	3,15	2,80	2,66	2,52
650	—	26,7	13,3	8,89	6,67	5,34	4,45	3,81	3,33	2,96	2,81	2,67
700	—	28,1	14,1	9,37	7,03	5,62	4,69	4,02	3,51	3,12	2,96	2,81
750	—	29,6	14,8	9,86	7,39	5,91	4,93	4,22	3,70	3,28	3,11	2,96
800	—	31,0	15,5	10,3	7,75	6,20	5,17	4,43	3,88	3,45	3,26	3,10

к максимально возможному удельному весу водяного пара при данных давлении и температуре смеси (γ_{max})

$$\varphi = \frac{\gamma_n}{\gamma_{max}}.$$

Относительная влажность может быть выражена как в долях единицы, так и в процентах.

Для температур влажного воздуха ниже температуры насыщения или равных ей значение γ_{max} при данном давлении равно удельному весу насыщенного водяного пара ($\gamma_н$), соответствующему температуре смеси, и для температур выше температуры насыщения — удельному весу перегретого водяного пара при данных температуре и давлении смеси. Значения γ_{max} см. в таблицах водяного пара.

Если считать влажный воздух идеальным газом, то

$$\varphi = \frac{p_n}{p_{max}},$$

где p_n — парциальное давление водяного пара во влажном воздухе; p_{max} — максимально возможное парциальное давление водяного пара, которое при температуре влажного воздуха ниже или равной температуре насыщения водяного пара при давлении влажного воздуха равно соответствующему давлению насыщения при температуре влажного воздуха ($p_н$) (см. таблицы водяного пара) или же при более высоких температурах — давлению смеси (p).

Используя соотношение $p_n = \varphi \cdot p_{max}$, можно выразить весовое влагосодержание следующим образом:

$$d = 622 \frac{\varphi \cdot p_{max}}{p - \varphi \cdot p_{max}}.$$

Степенью насыщения Ψ называется отношение весового влагосодержания воздуха d к максимально возможному d_{max} при той же температуре и общем давлении смеси

$$\Psi = \frac{d}{d_{max}};$$

Энтальпия i и влагосодержание d влажного воздуха на 1 $кГ$ содержа

$t°$ С	φ в %											
	100		90		80		70		60		50	
	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d
−10	−1,43	1,63	−1,53	1,47	−1,63	1,30	−1,72	1,14	−1,82	0,98	−1,91	0,82
0	2,30	3,85	2,06	3,46	1,83	3,07	1,60	2,69	1,37	2,30	1,15	1,92
10	7,07	7,78	6,60	7,00	6,12	6,21	5,66	5,43	5,19	4,65	4,72	3,87
20	13,87	15,00	12,94	13,46	12,01	11,94	11,10	10,42	10,18	8,91	9,27	7,41
30	24,13	27,78	22,37	24,89	20,63	22,03	18,89	19,19	17,17	16,37	15,47	13,59
40	40,30	49,98	37,00	44,62	33,77	39,35	30,58	34,16	27,44	29,05	24,33	24,0
50	66,72	88,42	60,57	78,47	54,58	68,79	48,75	59,38	43,07	50,21	37,55	41,29
60	112,0	156,6	100,1	137,5	88,8	119,3	78,0	102,0	67,68	85,44	57,81	69,61
70	196,3	286,0	171,4	246,2	148,5	209,7	127,4	176,1	108,0	145,2	89,87	116,3
80	380,2	571,3	317,3	471,6	263,9	387,1	218,1	314,5	178,3	251,6	143,5	196,5
90	981,1	1509,0	719,8	1097	542,3	818,2	413,9	616,3	316,8	463,6	240,8	344,1
99,4	—	—	3710	5761	1660	2556	977,3	1489	636,1	955,6	431,6	636,1
100	—	—	3708	5754	1660	2554	977,3	1488	636,2	955,1	431,7	635,8
120	—	—	3745	5721	1680	2540	991,0	1480	646,8	950,2	440,5	632,7
140	—	—	3788	5695	1701	2529	1006	1474	658,1	946,5	449,7	630,4
160	—	—	3832	5674	1724	2520	1021	1469	669,9	943,7	459,3	628,6
180	—	—	3879	5658	1748	2514	1037	1465	682,1	941,5	469,1	627,3
200	—	—	3929	5647	1772	2508	1054	1462	694,6	939,7	479,0	626,1
250	—	—	4059	5625	1837	2499	1097	1457	726,7	936,6	504,6	624,2
300	—	—	4194	5611	1905	2493	1141	1454	759,9	934,7	530,9	623,0
350	—	—	4335	5603	1974	2490	1187	1452	793,8	933,5	557,8	622,2
400	—	—	4479	5597	2045	2487	1234	1451	828,5	932,7	585,1	621,7
450	—	—	4627	5594	2118	2486	1282	1450	863,8	932,1	612,9	621,4
500	—	—	4778	5591	2192	2485	1331	1449	899,7	931,7	641,1	621,1
550	—	—	4932	5589	2268	2484	1380	1449	936,3	931,4	669,9	620,9
600	—	—	5090	5588	2346	2483	1431	1449	973,1	931,2	699,2	620,8
650	—	—	5249	5587	2424	2483	1482	1448	1011	931,1	728,9	620,7
700	—	—	5412	5586	2504	2483	1535	1448	1044	931,0	759,0	620,6
750	—	—	5578	5585	2585	2482	1588	1448	1089	930,9	789,6	620,6
800	—	—	5746	5585	2668	2482	1642	1448	1128	930,9	820,6	620,6

при этом

$$\varphi = \Psi \frac{d_{\max} + 622}{d + 622}.$$

Температура точки росы — это температура, при которой парциальное давление водяного пара $p_п$, содержащегося во влажном воздухе, равно давлению насыщенного водяного пара $p_н$ при той же температуре.

Объем влажного воздуха V_0 (табл. 35), приходящийся на 1 $кГ$ сухого воздуха, равен объему 1 $кГ$ сухого воздуха, входящего в смесь, при своем парциальном давлении

$$V_0 = \frac{R_в \cdot T}{p_в}$$

или

$$V_0 = 29{,}27 \frac{T}{p - \varphi \cdot p_{\max}} \; м^3/кГ \text{ сух.воздуха},$$

где $R_в = 29{,}27$ — газовая постоянная сухого воздуха; $p_в$ — парциальное давление сухого воздуха; при этом весовое влагосодержание может быть выражено в виде

$$d = V_0 \cdot \gamma_п \; Г/кГ \text{ сух. воздуха},$$

$\gamma_п$ — удельный вес водяного пара во влажном воздухе в $Г/м^3$ (табл. 33) вычисляется из соотношения

$$\gamma_п = \varphi \cdot \gamma_{\max} \; Г/м^3.$$

Удельный вес влажного воздуха

$$\gamma = \frac{p}{29{,}27 \cdot T} - 0{,}0129 \frac{\varphi \cdot p_{\max}}{T} \; кГ/м^3,$$

где p — давление смеси в $кГ/м^2$; $T = 273{,}16 + t$ — абсолютная температура смеси.

Удельный вес влажного воздуха может быть также вычислен по формуле

$$\gamma = \gamma_п \frac{1000 + d}{d} \; кГ/м^3.$$

Таблица 36

щегося в нем сухого воздуха при барометрическом давлении 745 *мм* рт. ст. [3]

φ в %												
40		30		20		10		5		0		$t°$ C
i	d	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d	
−2,01	0,65	−2,11	0,49	−2,20	0,33	−2,30	0,16	−2,35	0,08	−2,39	0,00	−10
0,91	1,53	0,69	1,15	0,46	0,77	0,23	0,38	0,11	0,19	0,00	0,00	0
4,25	3,09	3,78	2,31	3,32	1,54	2,85	0,77	2,62	0,38	2,39	0,00	10
8,36	5,91	7,46	4,42	6,57	2,94	5,67	1,47	5,28	0,73	4,78	0,00	20
13,78	10,82	12,11	8,08	10,45	5,36	8,81	2,67	7,99	1,33	7,18	0,00	30
21,30	19,07	18,31	14,20	15,36	9,40	12,44	4,66	11,00	2,32	9,58	0,00	40
32,17	32,60	26,92	24,13	21,81	15,88	16,83	7,84	14,39	3,90	11,97	0,00	50
48,37	54,48	39,33	39,98	30,67	26,10	22,35	12,78	18,33	6,33	14,38	0,00	60
73,23	89,83	57,65	65,03	43,12	41,90	29,52	20,27	23,05	9,97	16,78	0,00	70
112,8	148,0	85,50	104,8	61,07	66,15	39,08	31,41	28,89	15,32	19,18	0,00	80
179,7	248,1	129,5	169,3	87,61	103,5	52,09	47,81	36,28	23,02	21,59	0,00	90
295,3	423,4	198,2	271,7	125,3	158,1	68,95	70,23	45,20	33,24	23,86	0,00	99,4
295,5	423,2	198,3	271,7	125,6	158,2	69,11	70,22	45,36	33,24	24,0	0,00	100
303,1	421,3	205,0	270,5	131,5	157,6	74,44	69,97	50,44	33,13	28,85	0,00	120
310,9	419,9	211,8	269,7	137,5	157,2	79,81	69,78	55,54	33,04	33,71	0,00	140
318,9	418,8	218,7	269,0	143,6	156,8	85,24	69,64	60,68	32,97	38,59	0,00	160
327,1	417,9	225,7	268,5	149,8	156,5	90,70	69,52	65,85	32,92	43,49	0,00	180
335,4	417,2	232,8	268,1	156,0	156,3	96,19	69,43	71,03	32,88	48,40	0,00	200
356,6	416,0	250,9	267,4	171,7	155,9	110,0	69,27	84,10	32,81	60,75	0,00	250
378,3	415,3	269,3	266,9	187,6	155,7	124,0	69,17	97,28	32,76	73,20	0,00	300
400,4	414,8	288,0	266,6	203,7	155,5	138,2	69,10	110,6	32,73	85,75	0,00	350
422,9	414,4	307,0	266,4	220,1	155,4	152,5	69,06	124,0	32,71	98,40	0,00	400
445,7	414,2	326,2	266,3	236,6	155,3	166,9	69,03	137,6	32,70	111,1	0,00	450
468,8	414,1	345,6	266,2	253,3	155,3	181,5	69,00	151,2	32,68	124,0	0,00	500
492,3	413,9	365,5	266,1	270,3	155,2	196,3	68,99	165,2	32,68	137,1	0,00	550
516,3	413,9	385,6	266,0	287,6	155,2	211,4	68,98	179,3	32,67	150,4	0,00	600
540,5	413,8	406,0	266,0	305,1	155,2	226,6	68,97	193,5	32,67	163,8	0,00	650
565,1	413,8	426,6	266,0	322,7	155,2	241,9	68,96	207,9	32,67	177,3	0,00	700
590,1	413,7	447,6	266,0	340,7	155,1	257,5	68,96	222,5	32,66	191,0	0,00	750
615,3	413,7	468,7	266,0	358,7	155,1	273,2	68,95	237,2	32,66	204,8	0,00	800

Газовая постоянная влажного воздуха определяется из выражения

$$R = \frac{29{,}27}{1 - 0{,}377 \cdot \varphi \frac{p_{\max}}{p}} \text{ кГм/кг·град.}$$

или

$$R = \frac{p}{\gamma_n \cdot T} \cdot \frac{d}{1000 + d} \text{ кГм/кг·град.}$$

Условная теплоемкость влажного воздуха, отнесенная к 1 *кГ* сухого воздуха,

$$c_{см} = c_{возд} + 0{,}001 d \cdot c_n \text{ ккал/кг·град,}$$

где $c_{возд}$ — теплоемкость воздуха ($c_{p_{т\,возд}} \approx 0{,}24$); c_n — теплоемкость водяного пара ($c_n \approx 0{,}46$).

Энтальпия водяного пара во влажном воздухе с достаточной степенью точности может быть определена по формуле

$$i_n = 597 + 0{,}46t \text{ ккал/кГ;}$$

энтальпия водяного пара, приходящаяся на 1 *кГ* сухого воздуха, равна $0{,}001 d \cdot i_n$.

Энтальпия (табл. 36) влажного воздуха, отнесенного к 1 *кГ* сухого воздуха, $I = 0{,}24 \cdot t + 0{,}001 \cdot d\,(597 + 0{,}46t)$ *ккал* на 1 *кГ* сухого воздуха.

***i — d*-диаграмма проф. Л. К. Рамзина.** Для производства расчетов, связанных с влажным воздухом, используется *i — d*-диаграмма, предложенная проф. Л. К. Рамзиным.

i — d-диаграмма построена в косоугольных координатах с углом между осями 135°. По оси ординат отложена энтальпия влажного воздуха на 1 *кГ* содержащегося в нем сухого воздуха, по оси абсцисс — весовое влагосодержание влажного воздуха.

На диаграмме нанесены линии постоянных энтальпий, температур и относительных влажностей (в %), а также дается зависимость парциального давления водяного пара p_n от влагосодержания.

Диаграмма построена для давления смеси 745 *мм* рт. ст., что примерно соответствует среднему барометриче-

скому давлению в центральных областях Советского Союза. С достаточной для практических целей точностью указанной диаграммой можно пользоваться во всех случаях, когда процессы с влажным воздухом происходят при атмосферном давлении.

При давлении влажного воздуха, значительно отличающемся от атмосферного, линии постоянных относительных влажностей смещаются. С повышением давления они располагаются выше, а с понижением давления — ниже линий, нанесенных на диаграмме для давления 745 *мм* рт. ст. Линии постоянных температур от давления влажного воздуха не зависят.

Процесс подогрева или охлаждения влажного воздуха изображается на $i-d$-диаграмме вертикальной прямой ($d = \text{const}$) в пределах температур подогрева или охлаждения. При охлаждении влажного воздуха может наступить момент, когда из него начнет выпадать вода (температура росы). Эта точка определяется как пересечение линии $d = \text{const}$ с линией $\varphi = 100\%$.

Процесс сушки влажного материала влажным воздухом для идеальной сушилки изобразится как процесс при постоянной энтальпии ($i = \text{const}$). При этом пределом сушки будет, очевидно, пересечение линии $i = \text{const}$ с линией $\varphi = 100\%$, так как в этой точке воздух находится в состоянии полного насыщения водяными парами.

Если происходит смешение двух потоков влажного воздуха, при котором в процессе перемешивания не подводится тепло и не совершается работа против внешних сил, то параметры смеси (i_m, φ_m, d_m, t_m) легко определяются по $i-d$-диаграмме.

В этом случае точка на $i-d$-диаграмме, характеризующая состояние смеси, расположена на прямой, соединяющей точки, которые в свою очередь характеризуют состояния первого и второго потоков влажного воздуха, так как при этом имеет место соотношение

$$\frac{i_2 - i_m}{d_2 - d_m} = \frac{i_m - i_1}{d_m - d_1},$$

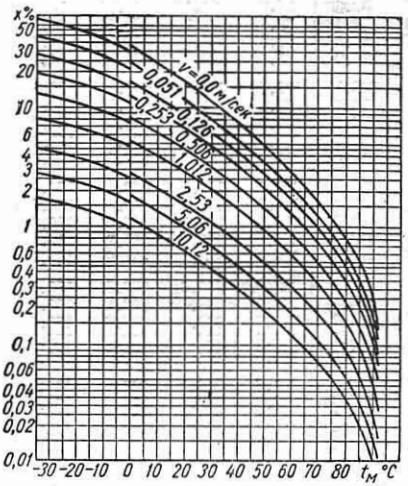
где i_1, d_1, i_2, d_2 и i_m, d_m — энтальпия и влагосодержание соответственно для потоков и для смеси.

Положение точки смешения на прямой линии определяется из соотношений:

$$l_1 = \frac{d_2 - d_m}{d_2 - d_1} \quad \text{и} \quad l_2 = \frac{d_m - d_1}{d_2 - d_1},$$

где l_1 и l_2 — весовые доли первого и второго потоков в смеси; очевидно, что $l_1 + l_2 = 1$. Точка смешения делит отрезок между точками, характеризующими состояния первого и второго потоков, в отношении $l_1 : l_2$.

На $i-d$-диаграмме нанесены также линии так называемой постоянной температуры мокрого термометра. Эти линии соответствуют процессу адиабатического увлажнения воздуха, т. е. процессу испарения воды в воздух.



Фиг. 75.

Для этого процесса справедливо равенство

$$i_1 = i_2 - t_2 \frac{d_2 - d_1}{1000};$$

следовательно, поскольку $t_2 = \text{const}$, линии на $i-d$-диаграмме получаются прямыми.

Линиями постоянной температуры мокрого термометра очень удобно пользоваться для нахождения влагосодержания влажного воздуха по показаниям психрометра.

Психрометр состоит из двух термометров; шарик одного из них непрерывно смачивается. Испарение влаги с шарика мокрого термометра — процесс, близкий к адиабатическому увлажнению воздуха.

Некоторое отклонение температуры мокрого термометра психрометра от температуры процесса адиабатического увлажнения воздуха объясняется нали-

чием восприятия тепла шариком термометра за счет лучеиспускания и за счёт притока тепла через столбик термометра. Поэтому в показание мокрого термометра необходимо внести поправку, которая зависит главным образом от скорости обтекания шарика воздухом.

Истинная температура мокрого термометра находится по формуле

$$t'_м = t_м - \frac{x\,(t_c - t_м)}{100},$$

где $t_м$ — показание мокрого термометра; $(t_c - t_м)$ — психрометрическая разность; x — поправка к $t_м$ в %, определяемая по графику (фиг. 75) в зависимости от $t_м$ и скорости воздуха, приведенной к 21° С и 760 *мм* рт. ст.

По известным t_c и $t'_м$ при помощи $i-d$-диаграммы графически определяется влажность воздуха. Для этого на линии $\varphi = 100\%$ находят точку, соответствующую температуре $t'_м$. Из этой точки параллельно ближайшей линии постоянной температуры мокрого термометра (на $i-d$-диаграмме они нанесены штриховой линией) проводится прямая до пересечения с изотермой t_c. Полученная точка пересечения характеризует состояние влажного воздуха.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Вукалович М. П. и Новиков И. И., Уравнение состояния реальных газов, Госэнергоиздат, 1948.
2. Вукалович М. П., Термодинамические свойства воды и водяного пара, Машгиз, 1951.
3. Вукалович М. П. и Новиков И. И., Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1952.
4. Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А., Силецкий В. С., Тимофеев В. Н., Термодинамические свойства газов, Машгиз, 1953.
5. Вукалович М. П., *i—s* диаграмма водяного пара, Госэнергоиздат, 1953.
6. Ястржембский А. С., Техническая термодинамика, ВВИА, ч. I, 1947, ч. II, 1949.
7. Сушков В. В., Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1953.
8. Керцелли Л. И. и Рыжкин В. Я., Тепловые электрические станции, Госэнергоиздат, 1949.
9. Жирицкий Г. С., Газовые турбины, Госэнергоиздат, 1948.
10. Кириллов И. И., Газовые турбины, Машгиз, 1948.
11. Преображенский В. П., Теплотехнические измерения и приборы, Госэнергоиздат, 1946.
12. Кириллин В. А., Шейндлин А. Е., Основы экспериментальной термодинамики, Госэнергоиздат, 1950.
13. Жоховский М. К., Техника измерения давления и разрежения, Машгиз, 1952.
14. Корндорф Б. А., Техника высоких давлений в химии, Госхимиздат, 1952.
15. Кей и Лэби, Справочник физика-экспериментатора, Издательство иностранной литературы, 1949.
16. Кириллин В. А. и Шейндлин А. Е., Циклы турбин внутреннего сгорания, МЭИ, 1949.
17. Кулагин И. И., Теория газотурбинных реактивных двигателей, ЛКВВИА, 1949.
18. Папалекси Н. Д., Курс физики, т. I, Гостехиздат, 1948.
19. Малков М. П. и Павлов К. Ф., Справочник по глубокому охлаждению, Гостехиздат, 1947.
20. Конструкционные стали, т. I, Металлургиздат, 1947.
21. Промышленные цветные металлы и сплавы, Металлургиздат, 1949.
22. Свойства металлов и сплавов, Металлургиздат, 1949.
23. Справочник по монтажу распределительных устройств, Госэнергоиздат, 1949.
24. Энциклопедический справочник „Машиностроение", т. 12, Машгиз, 1949.
25. Калафати Д. Д., Основы теории регенеративных циклов паросиловых установок высокого давления, Труды МЭИ, выпуск XI, Госэнергоиздат, 1953.
26. Менделеев Д. И., О сжимаемости газов, „Журнал Русского химического общества", 1872.
27. Справочник химика, Госхимиздат, т. I, т. III, 1951.
28. Бадылькес И. С., Рабочие вещества холодильных машин, Пищепромиздат, 1952.
29. Мартыновский В. С., Холодильные машины (Термодинамические процессы), Пищепромиздат, 1950.
30. Каган С. З. и Чечеткин А. В., Органические высокотемпературные теплоносители и их применение в промышленности, Госхимиздат, 1951.
31. Мартыновский В. С., Термодинамические характеристики циклов тепловых и холодильных машин, Госэнергоиздат, 1952.

ГЛАВА III

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные процессы теплопередачи

Передача тепла или теплообмен — самопроизвольный процесс передачи внутренней энергии от тел (или частей тела) с большей температурой к телам (или частям тела) с меньшей температурой. Передача тепла осуществляется теплопроводностью, конвекцией тепла и тепловым излучением.

Теплопроводность — процесс передачи тепла между непосредственно соприкасающимися частями тела, обусловленный тепловым движением молекул или атомов вещества (в металлах — свободных электронов).

Конвекция тепла — процесс переноса тепла из одной части пространства в другую текущей жидкостью или газом. Конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс конвекции тепла и теплопроводности называется *конвективным теплообменом*.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и потоком жидкости или газа называется *конвективной теплоотдачей*.

Тепловое излучение — процесс превращения внутренней энергии тела в лучистую и передачи лучистой энергии в пространство, окружающее тело. Процесс превращения падающей на тело лучистой энергии во внутреннюю называется *поглощением*. Процесс передачи тепла, обусловленный взаимным излучением и поглощением двух или нескольких тел, имеющих различную температуру, носит название *теплообмена излучением*.

Процесс передачи тепла от одной жидкости (или газа) к другой через разделяющую их твердую стенку называется *теплопередачей*.

Методы подобия и размерности

При изучении процессов теплообмена большую роль играет эксперимент. Теория подобия и размерности указывает рациональный метод постановки экспериментальных исследований и обобщения их результатов.

Физический процесс выражается математически с помощью уравнений процесса (обычно дифференциальных, интегральных или интегро-дифференциальных) и краевых условий (см., например, стр. 125).

В общем случае уравнения процесса и краевые условия связывают величины следующих категорий: зависимые переменные (т. е. искомые величины), независимые переменные (координаты, время) и постоянные (т. е. величины, не зависящие от координат и времени). Постоянные величины предполагаются известными, т. е. ранее заданными.

Всякое физическое уравнение является полным, т. е. может быть приведено к безразмерному виду.

Уравнения процесса и краевые условия, будучи приведены к безразмерному виду, содержат безразмерные величины, называемые *критериями подобия*. Критерии подобия могут быть *комплексами*, т. е. произведениями размерных величин в некоторых степенях (положительных или отрицательных) или *симплексами*, т. е. отношениями двух однородных величин. Однородными называются величины, имеющие одинаковую размерность, одинаковый физический смысл и отличающиеся только числовыми значениями. Критерии могут рассматриваться как новые безразмерные переменные и новые безразмерные постоянные. Критерии, составленные из независимых переменных и постоянных величин или только из постоянных величин, называются *определяющими*. Критерии, содержащие

хотя бы одну зависимую переменную, называются *определяемыми*.

Решение безразмерных уравнений процесса при заданных безразмерных краевых условиях имеет вид функциональных зависимостей между критериями подобия. Эти зависимости называются критериальными уравнениями.

Число критериев, которое содержит критериальное уравнение, указывает π-теорема.

π-теорема. Если физическое уравнение

$$f(a_1, a_2, \ldots, a_k, b_{k+1}, \ldots, b_n) = 0 \quad (1)$$

содержит n размерных величин, из которых первые k величин имеют независимую размерность, то безразмерная форма этого уравнения

$$F(\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_{n-k}) = 0 \quad (2)$$

содержит $n - k$ безразмерных величин.

В предположении, что величины $a_1, a_2, \ldots, a_k$ являются первичными,

$$\pi_1 = \frac{b_{k+1}}{\prod_{l=1}^{k} (a_l)^{m_{k+1;\,l}}}, \ldots,$$

$$\pi_{n-k} = \frac{b_n}{\prod_{l=1}^{k} (a_l)^{m_{n;\,l}}};$$

числа $m_{k+1;\,l}, \ldots, m_{n;\,l}$ обозначают размерности вторичных величин $b_{k+1}, \ldots, b_n$ относительно первичных величин a_l $(i = 1, 2, \ldots, k)$.

Размерность величины называется независимой, если она не может быть получена в результате комбинации размерностей других величин.

Из общего числа безразмерных величин π число комплексов равно $l - k$, а число симплексов равно $n - l$, где l — число групп однородных величин, которое содержится в n [43].

Уравнение (1) может рассматриваться как решение некоторой задачи математической физики, сформулированной в виде уравнений процесса и краевых условий, а уравнение (2) — как безразмерная форма того же решения.

Критериальные уравнения обычно представляются в виде зависимости определяемых критериев от критериев определяющих, например

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2, \pi_3, \ldots, \pi_{n-k}).$$

Конкретный вид критериев устанавливается путем непосредственного приведения уравнений процесса и краевых условий к безразмерному виду (см. [23], [27]) или с помощью π-теоремы (см. [1], [31]).

Процессы одинаковой физической природы называются *подобными*, если их критериальные уравнения полностью совпадают.

Теорема М. В. Кирпичева и А. А. Гухмана указывает: чтобы процессы были подобны, необходимо и достаточно, чтобы их уравнения и краевые условия полностью совпадали, за исключением числовых значений постоянных, а их одноименные определяющие критерии имели одинаковую величину.

Подобные процессы обладают следующими свойствами: а) все одноименные критерии подобных процессов имеют одинаковую величину; б) все величины, характеризующие один из подобных процессов, могут быть получены путем умножения одноименных величин, характеризующих другой процесс, на постоянные числа (константы подобия), которые для всех однородных величин одинаковы.

Критериальное уравнение, полученное в результате исследования данного процесса, будет справедливо для всех других процессов, подобных исследованному.

Теорема М. В. Кирпичева и А. А. Гухмана лежит в основе моделирования — эффективного метода научно-технических исследований.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Основные положения

В дальнейшем тело предполагается однородным и изотропным (т. е. физические свойства тела считаются не зависящими от места и направления), если на этот счет нет специальных оговорок.

В общем случае температура t тела изменяется в пространстве и во времени:

$$t = f(x, y, z, \tau),$$

где x, y, z — пространственные координаты, τ — время.

Совокупность значений температуры во всех точках тела в данный момент времени называется *температурным полем*. Если температура тела не изменяется во времени, т. е. $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, то температурное поле называется *стационарным*, в противном случае — *нестацио-*

нарным. Поверхности, все точки которых обладают одинаковой температурой, называются *изотермическими*. Производная от температуры по нормали к изотермической поверхности называется *градиентом температуры*

$$\operatorname{grad} t = \frac{\partial t}{\partial n} \; град/м;$$

$\operatorname{grad} t$ — вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры.

Передача тепла теплопроводностью происходит по направлению нормали к изотермической поверхности. Количество тепла, проходящее через элементарную площадку на изотермической поверхности, отнесенное к единице времени и единице поверхности элементарной площадки, называется *плотностью теплового потока*

$$\bar{q} = \frac{d^2Q}{d\tau \cdot d\bar{F}} \; ккал/м^2 \cdot час,$$

где $\bar{q}$ — вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону уменьшения температуры.

Количество тепла, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность площадью F, называется *тепловым потоком*:

$$Q = \int_F q dF \; ккал/час.$$

По закону Био-Фурье плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n},$$

где λ в *ккал/м·час·град* — физический параметр, называемый коэффициентом теплопроводности; он определяется из опыта и характеризует способность вещества (материала) проводить тепло; λ зависит от природы вещества, температуры и, в меньшей степени, от давления. Для большинства чистых металлов λ с увеличением температуры падает, для сплавов растет. Для строительных и теплоизоляционных материалов λ с увеличением t растет и, кроме того, сильно зависит от пористости (объемного веса) и влажности. Для большинства капельных жидкостей λ с увеличением t падает (вода — исключение), для газов — растет; в обоих случаях он мало зависит от давления. Для паров λ сильно зависит от температуры и давления. Значения λ для твердых тел даны в табл. 1—7, для жидкостей — в табл. 8 и 9, для газов и для паров — в табл. 10—12.

Связь между изменениями температуры в пространстве и во времени устанавливается на основе первого и второго законов термодинамики и закона Био-Фурье и выражается дифференциальным уравнением теплопроводности.

Это уравнение имеет вид:
если λ зависит от температуры

$$c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_v,$$

если λ — величина постоянная

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\gamma},$$

где $a = \dfrac{\lambda}{c\gamma}$ — коэффициент температуропроводности в *м²/час*; он характеризует скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле; c — теплоемкость в *ккал/кГ·град*; γ — удельный вес тела в *кГ/м³*; q_v — объемная производительность источников тепла в *ккал/м³·час*, численно равная количеству тепла, выделяемому источниками в единице объема тела в единицу времени; $\nabla^2 t$ — дифференциальный оператор второго порядка (оператор Лапласа).

В прямоугольных координатах

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}.$$

В цилиндрических координатах

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}.$$

В сферических координатах

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 t}{\partial \psi^2} + \frac{\cos\psi}{r^2 \sin\psi}\frac{\partial t}{\partial \psi} + \frac{1}{r^2 \sin^2\psi}\frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2},$$

где r — расстояние точки от начала координат; φ — долгота; ψ — широта.

Для стационарного режима уравнение теплопроводности имеет вид

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0;$$

при отсутствии внутренних источников тепла оно имеет следующий вид:

$$\nabla^2 t = 0.$$

Таблица 1

Объемный вес (γ), коэффициент теплопроводности (λ) и теплоемкость (*c*) строительных, теплоизоляционных и других материалов

Наименование материала	γ в $кГ/м^3$	t в °С	λ в $\frac{ккал}{м \cdot час \cdot град}$	c в $\frac{ккал}{кГ \cdot град}$
Альфоль при толщине воздушных слоев 10 *мм*	—	—	$0{,}026+0{,}000073\,t$	—
Асбест распушенный:				
3-й сорт	340	—	$0{,}075+0{,}00021\,t$	0,195
6-й „	650	—	$0{,}095+0{,}00016\,t$	0,195
Асбестовый картон	900	—	$0{,}14-0{,}00015\,t$	0,195
„ шнур	800	—	$0{,}11-0{,}00013\,t$	0,195
Асбошифер:				
с высоким содержанием асбеста	1800	20	0,15—0,3	—
с 10—50% асбеста (сухой)	1800	20	0,55—0,45	—
Асфальт	2120	0—30	0,52—0,64	0,40
Бетон с каменным щебнем	2000	0	1,1	0,20
То же сухой	1600	0	0,72	—
Железобетон набивной	2200	0	1,33	0,20
Шлакобетон	1500	0	0,60	0,19
Бумага обыкновенная	—	20	0,12	0,36
Вата хлопчатобумажная	80	30	0,036	—
Войлок строительный	100—300	—	0,04—0,08	0,45
Гипс (формованный, сухой)	1250	20	0,37	0,20—0,22
Глина	2000—1600	20	0,8—0,6	0,20
„ огнеупорная	1845	450	0,89	0,26
Глина с содержанием SiO_2 78%, Al_2O_3 18%, Fe_2O_3 3,3%, CaO 0,5%, температура обжига 1050° С	1810	145—1010	1,37	—
То же, температура обжига 1300° С	1900	310—1000	1,94	—
Гравий	1840	20	0,31	—
Дельта-древесина	—	35—70	0,18	—
Дерево:				
дуб поперек волокон	825	0,15	0,17—0,18	0,57
„ вдоль волокон	819	12—50	0,30—0,37	0,57
сосна поперек волокон	546	0—50	0,12—0,14	0,65
„ вдоль волокон	—	20—25	0,3—0,62	0,65
Фанера клееная	600	0	0,13	0,60
Древесный уголь кусковой	190	80	0,064	—
Каменный уголь:				
газовый	1420	20—100	3,1—3,4	—
обыкновенный твердый	1200—1350	20	0,21—0,23	—
Каменноугольная пыль	730	30—150	0,10 0,11	—
Картон	—	20	0,12—0,30	0,36
Кембрик (лакированный)	—	38	0,135	—
Кирпич:				
красный, машинной формовки	1800	0	0,66	0,21
„ ручной „	1700	0	0,60	0,21
силикатный	1900	0	0,70	0,20
Кладка из красного кирпича:				
на холодном растворе	1700	0	0,70	0,21
„ теплом „	1600	0	0,58	0,20
Кладка из силикатнго кирпича:				
на холодном растворе	1900	0	0,75	0,20
„ теплом „	1700	0	0,65	0,19
Кладка бутовая из камней средней плотности	2000	0	1,10	0,21
Карболит черный	1150	50	0,199	—
Кожа	—	20	0,12—0,14	—
Кокс порошкообразный	449	100	0,164	0,29
Котельная накипь:				
богатая гипсом	2000—2700	100	0,6—2	—
„ известью	1000—2500	100	0,13—2	—
„ силикатами	300—1200	100	0,07—0,20	—
Кварц кристаллический:				
поперек оси	—	0	0,62	—
вдоль „	—	0	1,67	—
Ламповая сажа	165	40	0,06—0,10	—
Лед	917	0	1,9	0,54
„	928	—100	3,0	0,28
Льняная ткань	—	—	0,076	—
Магнезия в форме сегментов для изоляции труб	266	50—200	0,063—0,072	—
Мел	2000	50	0,80	0,21

Продолжение табл. 1

Наименование материала	γ в $кГ/м^3$	t в °С	λ в $\frac{ккал}{м \cdot час \cdot град}$	c в $\frac{ккал}{кГ \cdot град}$
Миканит	—	20	0,18—0,35	—
Мрамор	2800	0	3,0	0,22
Парафин	920	20	0,23	—
Песок речной мелкий (сухой)	1520	0—160	0,26—0,33	0,19
Прессшпан	—	20—50	0,22—0,19	—
Плексиглас	—	20	0,158	—
Пробковые плиты, сухие	147—198	80	0,036—0,046	0,42
Пробковая мелочь, величина куска 4—5 *мм*	85	0—60	0,038—0,050	0,42
Резина:				
твердая обыкновенная	1200	0—100	0,135—0,138	0,33
мягкая	—	20	0,11—0,14	0,33
Сахарный песок	1600	0	0,50	0,30
Сера ромбическая	—	21	0,24	0,182
Сланец	—	94	1,28	—
Слюда (поперек слоев)	2600—3200	20	0,4—0,5	—
Снег:				
свежевыпавший	200	—	0,09	0,5
уплотненный	400	—	0,40	0,5
Стекло:				
зеркальное	2550	0—100	0,67—0,76	0,186
обыкновенное	2500	20	0,64	0,16
термометрическое	2590	20	0,83	—
пирекс	—	0	0,89	—
„	—	400	1,33	—
кварцевое	—	400	1,51	—
„	—	800	2,06	—
„	—	1200	2,62	—
Стеклянная вата	154—205	88	0,044—0,051	—
Текстолит	1300—1400	20	0,20—0,29	0,35—0,36
Фарфор	2400	95	0,89	0,26
„	2400	1055	1,69	0,26
Фибра красная	1290	20—100	0,40—0,43	—
Фибролит	360—440	80	0,063—0,110	—
Целлулоид	1400	30	0,18	—
Шелк	100	0—93	0,037—0,05	—
Эбонит	1200	20	0,135—0,15	—
Шлак:				
котельный	1000	0	0,25	0,18
доменный гранулированный	500	0	0,13	0,18
Штукатурка:				
известковая	1600	0	0,60	0,20
цементо-песчаная	1800	0	1,0	0,20

Таблица 2

Значения γ, λ, c и максимальной рабочей температуры для основных огнеупорных изделий [3]

Наименование огнеупора	Объемный вес $\gamma \cdot 10^3$ в $кГ/м^3$	Коэффициент теплопроводности λ в $ккал/м \cdot час \cdot град$	Удельная теплоемкость c в $ккал/кГ \cdot град$	Максимальная рабочая t в °С
Шамотный кирпич	1,8—1,9	$0,72+0,0005\ t$	$0,21+0,00055\ t$	1350—1450
Пеношамот	0,95	$0,24+0,0002\ t$	—	1350
„	0,6	$0,09+0,000125\ t$	—	1300
Кирпич:				
динасовый	1,9—1,95	$0,8+0,0006\ t$	$0,2+0,00006\ t$	1700
магнезитовый	2,6—2,8	$4,0-0,0015\ t$	$0,25+0,00007\ t$	1650—1700
хромомагнезитовый	2,75—2,85	1,6—1,7 (0—600° С)	—	1700
хромитовый	3,0—3,1	$1,1+0,00035\ t$	$0,2+0,00007\ t$	1650—1700
Изделия:				
силиманитовые (муллитовые)	2,2—2,4	$1,45-0,0002\ t$	$0,2+0,00006\ t$	1650
корундовые (алундовые)	2,3—2,6	$1,8+0,0016\ t$	$0,19+0,0001\ t$	1600—1700
циркониевые	3,3	$1,12+0,00055\ t$	$0,13-0,00003\ t$	1750—1800
карборундовые (карбофракс)	2,3—2,6	$18-0,009\ t$	$0,23+0,000035\ t$	1400—1500
угольные	1,35—1,6	$20+0,030\ t$ (до 1000° С)	0,2	2000
графитовые	1,6	$140-0,035\ t$	0,2	2000

Таблица 3

Значения γ, λ и предельной температуры применения основных изоляционных материалов и изделий [42]

Наименование материала или изделия	Объемный вес γ в *кГ/м*³		Коэффициент теплопроводности конструкции λ в *ккал/м·час·град*	Предельная температура применения в °С
	в порошке	в мастичной конструкции		
Изоляционные материалы				
Асбест пушеный 6-го сорта	800	—	0,112 +0,00016 *t*	700
Асбозонолит	350	500—550	0,123 +0,00016 *t*	700
Асбозурит	450	700	0,1395+0,000145 *t*	200—300
Асбослюда	400—500	580—650	0,103 +0,000127 *t*	600
Асботермит	400—430	550—570	0,094 +0,000125 *t*	500—550
Диатомит молотый	400—500	—	0,078 +0,00024 *t*	800
Зонолит (вермикулит)	150—250	—	0,062 +0,000225 *t*	900—1100
Минеральная вата	180—250	—	0,040 —0,050 при 50°	500
Новоасбозурит	400—450	580—650	0,124 +0,00012 *t*	250
Ньювель	180—200	405—465	0,075 +0,000055 *t*	325—370
Совелит	230—250	440—520	0,0775+0,000075 *t*	400—450
Торфяная крошка	200—350	—	0,05 —0,07	100
Ферригипс (паста Феррон)	—	400—550	0,06 —0,07	650
Шлаковая вата (сорт 0)	170—200	—	0,05 +0,000125 *t*	750
Изоляционные изделия				
Асбоцементные термоизоляционные плиты		300—400	0,075—0,08 при 50°	—
Вермикулитовые плиты		350—380	0,070+0,00013 *t*	700—750
Вулканитовые плиты		400	0,069+0,00018 *t*	550—600
Войлок строительный		300	0,04 при 0°	90
Диатомовый кирпич		500—600	0,097+0,0002 *t*	850
Диатомовые скорлупы и сегменты		500—600	0,097+0,0002 *t*	850
Изделия „новоизоль"		400—450	0,063+0,00024 *t*	400
Камышитовые плиты		260—360	0,09 при 0°	100
Минеральный войлок		250—300	0,050—0,065 при 50°	—
Пенобетонные блоки		400—500	0,085—0,105 при 50°	300
Пенодиатомовый кирпич		280—430	0,06—0,08 при 70°	600—800
Пеностекло (газостекло)		290—450	0,107—0,138 при 70°	600—800
Плиты „оргизоль"		280—350	0,067+0,00010 *t*	600
Пробковые плиты		250	0,06 при 0°	120
Совелитовые плиты		400—450	0,068+0,00016 *t*	450—500
Соломитовые маты		260—360	0,09 при 0°	100
Торфоплиты		170—250	0,04+0,00012 *t*	100—120
Шлаковая и минеральная пробка		270—350	0,055—0,070 при 50°	150
Шевелин		—	0,035+0,000127 *t*	—

Таблица 4

Коэффициенты теплопроводности чистых металлов (λ *ккал/м·час·град*) в зависимости от температуры (*t*° C) [44]

Название металла	*t*	λ	Название металла	*t*	λ	Название металла	*t*	λ
Алюминий 99,75%	−190	220	Кадмий чистый	−190	90	Олово чистое	−150	68
	0	197		−100	83		−100	64
	200	197		0	80		0	56,8
				100	79		100	51
Алюминий 99%	−100	180		200	78,5		200	49
	0	180						
	100	178	Калий чистый	0	117	Палладий очень чистый	−190	66
				100	102		0	59
Бериллий 99,5%	−180	81					100	63
	−100	108	Кобальт 97,1%	20	60			
	0	138				Платина очень чистая	−190	67
	100	164	Литий чистый	0	61		0	60,2
	200	185		100	61		100	61,4
							300	65
Висмут чистый	−190	22	Магний очень чистый	−190	160		500	68
	−100	10,4		0	148		800	74
	0	7,2		200	140		1000	77
	100	6,2						
	200	6,2	Магний 99,6%	0	124	Родий чистый	0	76
				100	120		100	69
Вольфрам	0	143		300	113			
	100	130		500	113	Ртуть чистая	−190	42
	500	103					−100	31
	1000	85	Медь электролитическая, очень чистая	−180	420		−50	24
	1500	98		0	340		0	7—9
	2000	117		100	337			
	2400	126				Свинец очень чистый	−250	42
			Медь 99,9 до 99,98%	−180	339		−200	35
Железо 99,92% (армко)	20	63		−100	350		−100	31,7
	100	58		0	332		0	30,2
	200	53		100	326		20	29,9
	400	42		200	321		100	28,7
	600	33		400	313		300	25,6
	800	25		600	304			
						Серебро >99,98%	−190	366
Железо кованое чистое	0	51	Молибден 99,84%	−180	150		0	360
	100	49		−100	119		100	358
	200	45		0	118			
	400	38		100	118	Серебро 99,9%	−100	361
	600	32					0	353
	800	25	Натрий чистый	0	86		100	337
				50	80		300	311
Чугун 3% C, без примесей	20	48—55					500	312
			Никель 99,94%	−180	95			
				0	89	Сурьма очень чистая	−190	18
Чугун с 1% Ni	20	43		100	71		−100	16,5
	100	42,5		200	63		0	15,2
	300	40		300	55		100	14,0
	500	32		400	51		300	13,6
				500	53		500	16
Сталь 99,2% Fe, 0,2% C	0	39						
	100	39	Никель 99,2%	0	58	Таллий чистый	−190	54
	300	37		100	54		0	44
	500	32		200	50			
	800	26		400	45	Тантал	0	47
				600	49		100	46,5
Золото 99,999%	−190	282		800	54		1000	55
	0	267					1400	62
	100	267	Никель 97—99%	−100	48		1800	71
				0	50			
Золото 99,98%	0	253		100	49	Цинк очень чистый	−100	99
	100	253		200	47		0	97
				400	72		100	94,5
Иридий чистый	0	51		600	46		200	91
	100	49		800	50		300	87

Таблица 5

Коэффициент теплопроводности сталей λ в *ккал/м·час·град* в зависимости от температуры *

Название и марка стали	Температура в °С								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Углеродистая 15	46,8	43,2	39,6	36,0	32,4	28,8			
„ 30	43,2	39,6	36,0	32,4	28,8	25,2			
Хромомолибденовая: Cr 1%, Mo 0,5%	38,0	–	32,6	—	28,0	25,2			
„ Cr 5%, Mo 0,5%	31,5	–	30,2	29,4	28,8	28,0			
Хромомолибденовая ЭИ107: Cr 10%, Mo 0,8%	15,8	—	18,7	—	—	21,2	21,9		
Хромоникельвольфрамовая жаростойкая ЭИ69: Cr 13—15%; Ni 13—15%, W 2—2,8%	13,3	—	15,6	—	–	18,2	18,9		
Хромоникелевая кислотоупорная (нержавеющая) ЭЯ1Т**, Cr 18%, Ni 8%	14,5	16,5	18,5	21	23	25,5	28	31	—
Хромоникелевая ЭЯ5С, ЭИ283; Cr 25%; Ni 20%	12,6	—	–	—	18,6	20,2	21,6	23,2	24,8
„ ЭЯ3С; Cr 20%; Ni 25%	13	—	—	—	19,5	21,2	22,5	—	—
Высокохромистая жароупорная Ж27	18	—	—	—	20,9	21,5	—	—	—
Хромистая нержавеющая ЭНЕРЖ 1	20,6	20,3	20	20	20,4	21	—	—	24
„ „ ЭНЕРЖ 6	14,6	15,5	16,4	17,4	18,3	19,2	20,2	21,1	22
„ „ ЭНЕРЖ 7	13,8	15,5	17,2	18,9	20,7	22,3	23,2	—	—

* Данные о теплопроводности и теплоемкости сталей см. [26], [36].
** Значения λ для различных образцов стали ЭЯ1Т изменяются в пределах ±20%. Здесь приведены средние значения λ.

Таблица 6

Коэффициент теплопроводности λ в *ккал/м·час·град* металлов и сплавов в зависимости от температуры

Название металла и сплава	Температура *t* в °С							
	0	20	100	200	300	400	500	600
Алюминий	174	—	177	197	234	274	319	364
Алюминиевые сплавы:								
92% Al, 8% Mg	88	91	106	127	—	—	—	—
80% Al, 20% Si	136	138	145	150	—	—	—	—
Дуралюмин 94—96% Al, 3—5% Cu, 0,5% Mg	137	142	156	167	—	—	—	—
Латунь:								
90% Cu, 10% Zn	88	—	101	115	128	143	155	163
70% Cu, 30% Zn	91	—	94	95	98	100	103	104
67% Cu, 33% Zn	86	—	92	97	104	110	116	130
60% Cu, 40% Zn	91	—	103	118	131	145	160	172
Монель-металл 29% Cu, 67% Ni, 2% Fe	—	19,0	21,0	23,7	26	29	—	—
Нейзильбер 62% Cu; 15% Ni, 22% Zn	—	21,5	27	34	39	42	—	—
Нихром:								
90% Ni, 10% Cr	14,7	15,0	16,3	18,0	19,6	21,2	—	—
80% Ni, 20% Cr	10,5	10,8	11,9	13,4	14,8	16,3	—	19,4
Нихром железистый: 61% Ni, 15% Cr, 20% Fe, 4% Mn	—	10,0	10,2	10,5	10,7	10,9	—	11,3
61% Ni, 16% Cr, 23% Fe	10,2	10,4	11,4	12,6	13,8	15,0	—	—
Сталь мягкая	54	—	49	45	40	36	31	27

Таблица 7

Коэффициент теплопроводности сплавов

Сплав	*t* в °С	λ в *ккал/м·час·град*	Сплав	*t* в °С	λ в *ккал/м·час·град*
Алюминиевая бронза 95% Cu, 5% Al	20	71	Медные сплавы:		
Бронза:			70% Cu, 30% Mn	20	11
90% Cu, 10% Sn	20	36	90% Cu, 10% Ni	20—100	50—65
75% Cu, 25% Sn	20	22	80% Cu, 20% Ni	20—100	29—35
88% Cu, 10% Sn, 2% Zn	20	41	40% Cu, 60% Ni	20—100	19—22
Бронза фосфористая:			Металл Розе 50% Bi, 25% Pb, 25% Sn	20	14
92,8% Cu, 5% Sn, 2% Zn, 0,15% P	20	68	Металл Вуда 48% Bi, 26% Pb, 13% Sn, 13% Cd	20	11
91,7% Cu, 8% Sn, 0,3% P	20	39	Никелевые сплавы:		
87,2% Cu, 12,4% Sn, 0,4% P	20	31	70% Ni, 28% Cu, 2% Fe	20	30
Инвар 35% Ni, 65% Fe	20	9,5	62% Ni, 12% Cr, 26% Fe	20	11,5
Константан 60% Cu, 40% Ni	20	19,5	Никелевое серебро	0	25,2
То же	100	22,0	То же	100	32
Манганин:			Платино-иридий 90% Pt, 10% Ir	0—100	26,6—27
84% Cu, 4% Ni, 12% Mn	20	18,8	Платино-родий 90% Pt, 10% Rh	0—100	26—26,3
84% Cu, 4% Ni, 12% Mn	100	22,7	Электрон 93% Mg, 4% Zn, 0,5% Cu	20	100
Магниевые сплавы:					
92% Mg, 8% Al	20—200	53—68			
88% Mg, 10% Al, 2% Si	20—200	50—65			
92% Mg, 8% Cu	20—200	108—114			

Таблица 8

Коэффициент теплопроводности жидкостей в зависимости от температуры

Вещество	t в °С	λ в $\frac{ккал}{м \cdot час \cdot град}$	Вещество	t в °С	λ в $\frac{ккал}{м \cdot час \cdot град}$
Аммиак	0—100	0,464—0,269	Серная кислота: 90%	30	0,312
»	—15—+30	0,432	60%	30	0,372
Водный раствор аммиака 26%	20—60	0,388—0,431	30%	30	0,456
Амилацетат	0—50	0,119—0,075	Сернистый ангидрид	—20—+30	0,192—0,166
Анилин (светлый)	0—150	0,160—0,136	Скипидар (терпентин)	15	0,11
Ацетон	0—100	0,150—0,130	Спирт амиловый	0—100	0,143—0,132
Бензол	0—125	0,130—0,103	Спирт:		
Бензин γ=900 $кГ/м^3$	0—50	0,125—0,095	изоамиловый	0—100	0,130—0,126
Бромбензол	30—100	0,110—0,104	бутиловый 97%	0—75	0,134—0,124
Вазелиновое масло	0—150	0,108—0,099	изопропиловый 97,5%	0—75	0,132—0,122
Глицерин	0—150	0,238—0,254	метиловый 99%	0—75	0,184—0,176
Гептан (n—)	30—60	0,121—0,118	этиловый: 97%	0—75	0,163 0,148
Гексан (n—)	0—100	0,119—0,116	100%	0—80	0,160—0,150
Диэтиленгликоль	0—100	0,174—0,184	80%	0—80	0,164—0,275
Дихлордифторметан	—7—+15	0,085—0,079	60%	0—80	0,216—0,328
»	15—82	0,079—0,0565	40%	0—80	0,300—0,415
Дихлорэтан	50	0,122	20%	0—80	0,385—0,498
Дихлорметан	—15—+30	0,165—0,144	Толуол	0—125	0,121—0,096
Дизельное топливо (летнее)	10—130	0,113—0,101	Трихлорэтилен	50	0,119
Касторовое масло	0—150	0,158—0,142	Трихлорэтан (β—)	50	0,115
Керосин	20—75	0,128—0,121	Хлорбензол	10	0,123
Ксилол	0—125	0,117—0,097	Хлороформ	30	0,119
Крекинг-мазут (грозненский)	27—47	0,117—0,115	Хлористый натрий:		
Мазут А	32—65	0,102—0,099	12,5% рассол	30	0,506
Масло трансформаторное	0—100	0,115—0,107	25% »	30	0,490
Муравьиная кислота	0—75	0,224—0,212	Хлористый кальций:		
Натрий	100	72,9	15% рассол	30	0,506
»	210	68,4	30% »	30	0,476
Нефтяной эфир	30—75	0,112—0,109	Хлористый метил	—20—+30	0,168—0,132
Нитробензол	0—125	0,132—0,117	Уксусная кислота 97,5%	0—75	0,152—0,139
Октан (n—)	0—100	0,128—0,118	Углекислота p=60 $кГ/см^2$	10—20	0,087—0,076
Паральдегид	30—100	0,125—0,116	» p=90 »	10—30	0,092—0,071
Парафин γ=880 $кГ/м^3$	0—100	0,103	Четыреххлористый углерод	0—68	0,159—0,140
»	200	0,107	Этилацетат	12	0,125
Пентан (—n)	—200—+100	0,146—0,107	»	45	0,106
Ртуть	См. табл. 4		Этиленгликоль	0—100	0,219—0,231
			Эфир	30—75	0,119—0,116

В табл. 8 первое значение λ относится к первому значению t, второе — ко второму; в пределах значений t, указанных в таблице, допускается линейная интерполяция. Составы приведены в процентах по весу. Таблица составлена по опытным данным советских и иностранных авторов [44], [45]. В частности, использованы работы ВТИ.

Таблица 9

Коэффициент теплопроводности воды λ в $ккал/м \cdot час \cdot град$
(по данным Д. Л. Тимрота и Н. Б. Варгафтика) [9]

Температура t в °С	p в $кГ/см^2$				Температура t в °С	p в $кГ/см^2$				Температура t в °С	p в $кГ/см^2$			
	100	200	300	400		100	200	300	400		100	200	300	400
0	0,477	0,480	0,484	0,488	140	0,596	0,602	0,608	0,615	280	0,500	0,512	0,526	0,538
20	0,519	0,523	0,528	0,533	160	0,593	0,599	0,606	0,613	300	0,466	0,482	0,499	0,513
40	0,549	0,554	0,559	0,564	180	0,587	0,593	0,600	0,609	320	—	0,444	0,463	0,482
60	0,571	0,575	0,580	0,585	200	0,578	0,584	0,593	0,602	340	—	0,392	0,422	0,447
80	0,584	0,589	0,594	0,599	220	0,564	0,572	0,582	0,591	360	—	0,314	0,364	0,401
100	0,593	0,598	0,603	0,608	240	0,547	0,557	0,567	0,577	370	—	—	0,326	0,376
120	0,596	0,602	0,608	0,614	260	0,526	0,536	0,547	0,558					

Таблица 10

Коэффициент теплопроводности газов и паров при p=1 *кГ/см²* или в области, где λ не зависит от p

Название пара или газа	t в °С	$\lambda \cdot 10^3$ в *ккал/м·час·град*	Название пара или газа	t в °С	$\lambda \cdot 10^3$ в *ккал/м·час·град*	Название пара или газа	t в °С	$\lambda \cdot 10^3$ в *ккал/м·час·град*
Аммиак	−60	14,1	Гексилен (*n*—)	0	8,95	Спирт метиловый	0	12,3
	0	19,0		100	16,1		50	15,6
	100	27,5	Гелий	−200	50,9		100	19
Ацетилен	75	10,1		−100	88,7	Спирт этиловый	0	11,9
	0	16,1		0	106,5		50	15,0
	100	25,6		−100	146,5		100	18,3
Ацетон	0	8,4	Дихлордифторметан			Сернистый ангидрид	0	7,4
	50	11,2		0	7,14		100	10,3
	100	14,5		50	9,51	Хлор	0	6,7
	150	18,5		100	11,9	Хлороформ	0	5,6
	200	23,3		150	14,4		50	6,9
Бензол	0	7,6	Дихлорметан (CH_2Cl_2)				100	8,6
	50	11,1		0	5,7		200	12,0
	100	15,1		50	7,3	Хлористый метил	0	7,8
	150	19,4		100	9,3		50	10,8
	200	24,4		200	13,3		100	13,9
Бутан (*n*—)	0	11,6	Метан	−100	15,8		150	17,1
	100	20,1		− 50	20,8		200	20,7
Бутан (изо-)	0	11,9		0	26	Этан	−50	11,4
	100	20,7		50	32		0	15,7
Гептан (*n*—)	100	15,3	Окись углерода	−100	13,0		50	21,4
	200	16,7		0	19,8		100	28,2
Гексан (*n*—)	0	10,7	Пропан	0	13,0	Этилен	0	15,0
	20	11,9		100	22,5	Циклогексан	100	11,6
			Ртуть	200	29,4*			

* По другим данным [44] при t=200° С λ=0,0066 *ккал/м·час·град*.

Таблица 11

Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^3$ *ккал/м·час·град* для двух- и трехатомных газов в зависимости от температуры по данным ВТИ [11]

t в °С	Кислород O_2	Азот N_2	Водород H_2	Двуокись углерода CO_2	Водяной пар H_2O	Дымовые газы (CO 13%) при содержании H_2O в %				
						5	10	15	20	25
0	21,55	21,38	150	12,42	13,89	19,3	19,8	19,9	19,9	20,0
100	27,99	27,09	186	19,52	21,19	26,6	27,2	27,6	27,8	28,0
200	34,37	32,30	222	26,70	28,94	33,7	34,5	35,2	35,8	36,1
300	40,64	37,31	258	33,86	39,24	42,2	43,7	44,9	45,8	46,6
400	46,65	42,44	294	40,84	49,06	47,0	48,9	50,7	52,1	53,1
500	52,40	47,47	330	47,60	60,16	53,2	55,9	58,2	60,1	61,6
600	57,72	52,35	366	54,07	72,10	59,4	62,8	65,7	68,2	70,5
700	62,82	57,08	402	60,27	84,68	65,0	69,3	72,9	76,1	78,8
800	67,69	61,63	438	66,12	98,10	70,4	75,5	80,1	84,1	87,2
900	72,00	66,03	474	71,74	111,90	75,5	81,7	87,1	92,1	96,3
1000	76,36	70,27	510	77,10	126,10	80,8	87,8	94,4	100	105
1100	80,60	74,29	546	82,26	140,50	85,8	93,7	101	108	114
1200	84,60	78,17	582	97,11	155,00	—	—	—	—	—

Таблица 12

Коэффициент теплопроводности водяного пара $\lambda \cdot 10^4$ в *ккал/м·час·град*
(по данным Д. Л. Тимрота и Н. Б. Варгафтика, обработанным В. Н. Тимофеевым) [9]

t в °С	$\lambda_{нас}$	p в *кГ/см²*									
		1	20	40	60	80	100	150	200	250	300
100	213	213	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	254	251	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	305	290	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250	389	342	359	387	—	—	—	—	—	—	—
300	530	393	410	432	462	—	—	—	—	—	—
350	964	441	458	478	500	529	567	753	—	—	—
400	—	491	507	525	546	569	597	692	825	1330	—
450	—	544	559	577	597	615	640	712	813	963	1222
500	—	602	617	634	652	672	693	754	831	933	1067
550	—	660	674	691	709	727	749	822	868	954	1038
600	—	722	735	750	768	787	807	856	918	993	1063

Для расчета конкретных процессов теплопроводности к дифференциальному уравнению присоединяют условия однозначности, включающие: а) геометрические условия, которые задают геометрическую форму и размеры тела; б) физические условия, которые задают значения физических параметров (a, λ), и закон распределения в пространстве и изменения во времени производительности источников тепла; в) начальные условия, которые задают распределение температуры внутри тела в начальный момент времени; г) граничные условия, которые задают распределение температуры или плотности теплового потока на поверхности тела или температуру окружающей среды и закон теплообмена между телом и средой. Условия в) и г) называются краевыми условиями.

В качестве простейшего соотношения, связывающего плотность теплового потока на границе тела (q_c) и температуры поверхности тела (t_c) и окружающей среды, т. е. жидкости или газа ($t_{ж}$), принимается закон Ньютона-Рихмана:

$$q_c = \alpha (t_c - t_{ж}),$$

где α — коэффициент теплоотдачи в *ккал/м²·час·град*, численно равный q_c при $t_c - t_{ж} = 1°$ С и характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей его жидкостью или газом; в этом уравнении α считается не зависящим от координат и времени (а следовательно, от разности $t_c - t_{ж}$).

Способы определения α для различных случаев теплообмена см. стр. 143—152.

Теплопроводность при стационарном режиме

Плоская стенка. На боковых поверхностях плоской безграничной стенки толщиной δ поддерживаются известные постоянные температуры t_{c1} и t_{c2}, причем $t_{c1} > t_{c2}$.

Температура стенки на расстоянии x от боковой поверхности с температурой t_{c1} определяется по формулам:

если λ не зависит от температуры,

$$t = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} x \ ;$$

если $\lambda = \lambda_0 (1 + \beta_\lambda t)$, т. е. линейно зависит от t, то

$$t = \frac{1}{\beta_\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^2 - \frac{2\beta_\lambda q}{\lambda_0} x} - 1 \right],$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала стенки в *ккал/м·час·град*; λ_0 и β_λ — постоянные числа (значения λ_0

и $\lambda_0 \cdot \beta_\lambda$ см. табл. 2 и 3); λ_1 — значение λ при $t = t_{c1}$; q — плотность теплового потока в *ккал/м²·час*; δ — толщина стенки в *м*.

Тепловой поток через стенку

$$Q = q \cdot F = \frac{\lambda}{\delta}(t_{c1} - t_{c2}) F \text{ ккал/час},$$

где F — поверхность стенки с одной стороны в $м^2$.

Если λ линейно зависит от t, то значение λ в формуле для Q выбирается при температуре, равной $\frac{1}{2}(t_{c1} + t_{c2})$.

Безграничная стенка разделяет две среды, температуры которых $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$ постоянны, причем $t_{ж1} > t_{ж2}$. В этом случае тепловой поток

$$Q = K(t_{ж1} - t_{ж2}) F \text{ ккал/час}, \qquad (3)$$

или

$$Q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{R} F \text{ ккал/час}. \qquad (3а)$$

где

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град};$$

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \text{ м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град/ккал};$$

α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от первой среды к стенке и от стенки ко второй среде в *ккал/м²·час·град*.

Величина K, численно равная Q при $F = 1\ м^2$ и $t_{ж1} - t_{ж2} = 1°$ С, называется *коэффициентом теплопередачи*.

Величина R называется *общим термическим сопротивлением стенки*, а величины $\frac{1}{\alpha_1}$, $\frac{\delta}{\lambda}$ и $\frac{1}{\alpha_2}$ — *частными термическими сопротивлениями*.

Температуры на внешних поверхностях стенки

$$t_{c1} = t_{ж1} - \frac{q}{\alpha_1};$$

$$t_{c2} = t_{ж2} + \frac{q}{\alpha_2}.$$

Формулы (3) и (3а) справедливы и для стенки, состоящей из n плотно прилегающих друг к другу слоев из различных материалов, с той лишь разницей, что в этом случае

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град},$$

где λ_i и δ_i — коэффициенты теплопроводности материала и толщины соответствующих слоев.

Температура многослойной стенки на границе между i-м и $(i+1)$-м слоями

$$t_{c,\,i+1} = t_{c1} - q\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \ldots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}\right) = t_{ж1} - q\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \ldots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}\right).$$

В технических расчетах приведенными выше формулами обычно пользуются для стенок конечных размеров. Совершаемой при этом ошибкой можно пренебречь, если линейные размеры боковой поверхности стенки больше или равны $10\,\delta$.

Цилиндрическая стенка. На внутренней и наружной поверхностях длинного полого цилиндра поддерживаются постоянные температуры t_{c1} и t_{c2}.

Температура стенки цилиндра на расстоянии r от оси определяется по следующим формулам:

если λ не зависит от температуры, то

$$t = t_{c1} - \frac{q_l}{2\pi\lambda} \ln \frac{r}{r_1};$$

если $\lambda = \lambda_0(1 + \beta_\lambda t)$, т. е. линейно зависит от t, то

$$t = \frac{1}{\beta_\lambda}\left[\sqrt{\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^2 - \frac{\beta_\lambda q_l}{\pi\lambda_0} \ln \frac{r}{r_1}} - 1\right],$$

где $q_l = \frac{Q}{l}$ — тепловой поток, отнесенный к единице длины цилиндра в *ккал/м·час*; r_1 — внутренний радиус цилиндра.

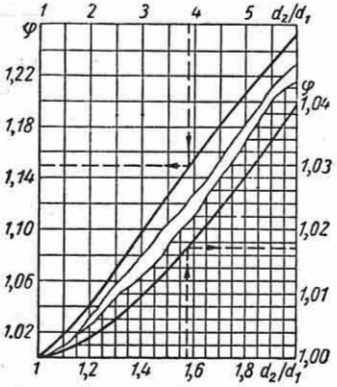
Тепловой поток через стенку цилиндра

$$Q = q_l l = \frac{2\pi\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}} l \text{ ккал/час};$$

или

$$Q = \frac{\pi d_{ср}}{\varphi} \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})\, l \ \text{ккал/час},$$

где l — длина цилиндра в $м$; d_1 и d_2 — внутренний и наружный диаметры цилиндра в $м$; $d_{ср} = \frac{1}{2}(d_1 + d_2)$; δ — толщина стенки в $м$; $\varphi = f\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$ — коэффициент кривизны (фиг. 1) [23].



Фиг. 1. Коэффициент кривизны цилиндрической стенки.

Если λ линейно зависит от t, то значение λ в формулах для Q выбирается при температуре, равной $\frac{1}{2}(t_{c1} + t_{c2})$.

Внутри и снаружи длинного полого цилиндра поддерживаются постоянные температуры среды $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$, причем $t_{ж1} > t_{ж2}$. В этом случае тепловой поток

$$Q = \pi K_l (t_{ж1} - t_{ж2})\, l \ \text{ккал/час} \quad (3б)$$

или

$$Q = K_1 (t_{ж1} - t_{ж2}) F_1 = K_2 (t_{ж1} - t_{ж2}) F_2,$$

где

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \ \text{ккал/м·час·град};$$

$$K_1 d_1 = K_2 d_2 = K_l;$$

F_1 и F_2 — внутренняя и наружная поверхности цилиндра в $м^2$; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от первой среды к стенке и от стенки ко второй среде в $ккал/м^2 \cdot час \cdot град$.

Величина K_l называется *коэффициентом теплопередачи цилиндрической стенки*. Величина $R_l = \frac{1}{K_l}$ называется *общим термическим сопротивлением цилиндрической стенки*. Зависимость R_l от d_2 имеет минимум при значении d_2, равном $d_{2кр} = \frac{2\lambda}{\alpha_2}$; поэтому при $d_2 < d_{2кр}$ величина Q растет с увеличением d_2, а при $d_2 > d_{2кр}$ — падает.

Если толщина цилиндрической стенки мала по сравнению с ее диаметром, то K_1 и K_2 приблизительно одинаковы и равны коэффициенту теплопередачи для плоской стенки.

Температуры на внутренней и наружной поверхностях цилиндрической стенки

$$t_{c1} = t_{ж1} - \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 d_1};$$

$$t_{c2} = t_{ж2} + \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 d_2}.$$

Формула (3б) справедлива также для цилиндрической стенки, состоящей из n плотно прилегающих друг к другу слоев из различных материалов, с той лишь разницей, что в этом случае

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \ \text{ккал/м·час·град},$$

где λ_i — коэффициент теплопроводности, а d_i и d_{i+1} — внутренний и внешний диаметры слоя i.

Температура многослойной цилиндрической стенки на границе между i-м и $(i+1)$-м слоями

$$t_{c,\,i+1} = t_{ж1} - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \ldots + \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right).$$

Шаровая стенка. На внутренней и наружной поверхностях полого шара поддерживаются постоянные температуры соответственно t_{c1} и t_{c2}.

Температура шаровой стенки на расстоянии r от центра

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{r_2}{\delta} \left(1 - \frac{r_1}{r}\right).$$

Тепловой поток через стенку

$$Q = \pi\lambda \frac{d_1 d_2}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) \text{ ккал/час}$$

Внутри и снаружи полого шара поддерживаются постоянные температуры среды $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$.

В этом случае

$$Q = \frac{\pi (t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda}\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}} \text{ ккал/час.}$$

Здесь r_1 и r_2, d_1 и d_2 — внутренний и наружный радиусы и соответственно диаметры шара в *м*; δ — толщина стенки шара в *м*; λ — коэффициент теплопроводности материала стенки в *ккал/м·час·град*; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях шара в *ккал/м²·час·град*.

Ребристая стенка. Плоская стенка или стенка трубы (во втором случае $\delta \ll d$) из хорошо теплопроводного материала, гладкая с одной и ребристая с другой стороны (для трубы ребристая снаружи) разделяет две среды, температуры которых $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$ постоянны. Коэффициент теплоотдачи со стороны гладкой поверхности α_1, со стороны ребристой поверхности α_2, причем $\alpha_2 \ll \alpha_1$.

Тепловой поток от первой среды ко второй через ребристую стенку

$$Q = K_{pc} (t_{ж1} - t_{ж2}) F_{pc} \text{ ккал/час,}$$

где

$$K_{pc} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c}\right)\frac{F_{pc}}{F_c} + \frac{1}{\alpha_{2\,пр}}} \text{ ккал/м²·час·град;}$$

δ_c — толщина, а λ_c — коэффициент теплопроводности материала собственно стенки (т. е. плоской стенки или стенки трубы без ребер); F_c — площадь гладкой поверхности стенки; $F_{pc} = F_p + F_n$ — площадь ребристой поверхности стенки, равная сумме площади ребер F_p (исключая площадь торцов ребер, которой пренебрегают) и площади стенки F_n в промежутках между ребрами.

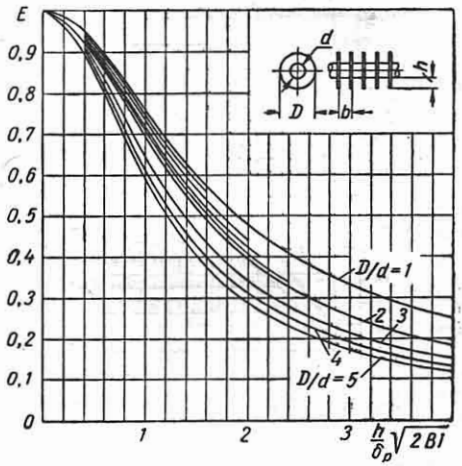
Приведенный коэффициент теплоотдачи со стороны ребристой поверхности

$$\alpha_{2\,пр} = \frac{1}{F_{pc}} (\alpha_p E F_p + \alpha_n F_n).$$

Коэффициенты теплоотдачи на поверхности ребер (α_p) и на поверхности стенки в промежутках между ребрами (α_n) приближенно можно считать одинаковыми, т. е. $\alpha_p = \alpha_n = \alpha_2$; тогда

$$\alpha_{2\,пр} = \frac{\alpha_2}{F_{pc}} (E F_p + F_n), \qquad (4)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи со стороны ребристой поверхности (см. стр. 147); E — коэффициент эффективности ребра.



Фиг. 2. Коэффициент эффективности для круглых ребер.

Для прямых ребер постоянной толщины на плоской поверхности

$$E = \frac{\text{th}\left(\frac{h}{\delta_p}\sqrt{2\text{Bi}}\right)}{\frac{h}{\delta_p}\sqrt{2\text{Bi}}},$$

где $\text{Bi} = \frac{\alpha_p \delta_p}{\lambda_p}$ — критерий Био; h — высота и δ_p — толщина ребра; λ_p — коэффициент теплопроводности материала ребра.

Для круглых и квадратных ребер постоянной толщины (на внешней поверхности трубы)

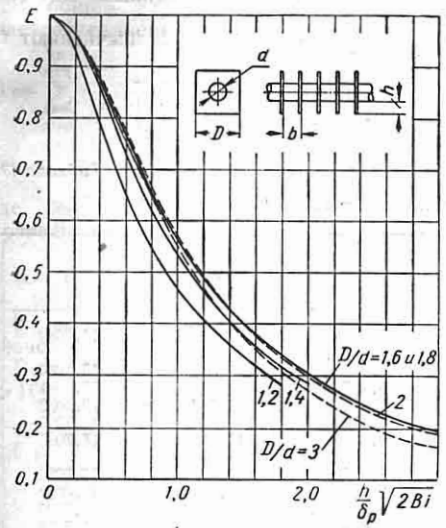
$$E = f\left(\frac{h}{\delta_p}\sqrt{2\text{Bi}}, \frac{D}{d}\right).$$

Для круглых ребер эта зависимость представлена на фиг. 2, для квадратных — на фиг. 3 [15]; здесь D — наружный диаметр круглого или сторона ква-

дратного ребра; d — наружный диаметр трубы;

$$h = \frac{1}{2}(D - d).$$

Расчет ребер трапецоидального сечения производится по тем же формулам, что и ребер постоянной толщины, с той лишь

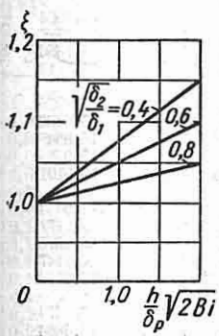


Фиг. 3. Коэффициент эффективности для квадратных ребер.

разницей, что величина δ_p берется равной $\delta_p = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2)$, а величина E умножается на поправочный коэффициент ξ. Значения ξ выбираются по графику фиг. 4, в зависимости от

$$\frac{h}{\delta_p}\sqrt{2\mathrm{Bi}} \text{ и } \sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1}},$$

где δ_1 и δ_2 — толщины ребра соответственно у основания и у торца.



Фиг. 4. Поправочный коэффициент ξ для трапецоидальных ребер.

Теплопроводность при наличии внутренних источников тепла. Тонкая пластина или длинный цилиндр, внутри которых действуют равномерно распределенные источники тепла, находятся в среде постоянной температуры $t_{ж}$.

Температура пластины на расстоянии x от оси

$$t = \frac{q_v}{2\lambda}(S^2 - x^2) + \frac{q_v S}{\alpha} + t_{ж}$$

и температура цилиндра на расстоянии r от оси

$$t = \frac{q_v}{4\lambda}\left(r_0^2 - r^2\right) + \frac{q_v r_0}{2\alpha} + t_{ж},$$

где q_v — объемная производительность источников тепла в *ккал/м³·час*; λ — коэффициент теплопроводности материала пластины или цилиндра в *ккал/м·час·град*; $2S$ — толщина пластины в *м*; r_0 — радиус цилиндра в *м*; α — коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины или цилиндра к окружающей среде в *ккал/м²·час·град*.

Плотность теплового потока на боковой поверхности пластины $q = q_v \times S$ *ккал/м²·час*; на боковой поверхности цилиндра $q = q_v \frac{r_0}{2}$ *ккал/м²·час*.

Если источником тепла служит протекающий по проводнику электрический ток, то

$$q_v = \frac{0{,}86 \cdot I^2 R}{V} \text{ ккал/м}^3\cdot\text{час},$$

где I — сила тока в *а*; R — электрическое сопротивление проводника в *ом*; V — объем проводника в $м^3$.

Теплопроводность при нестационарном режиме

Охлаждение (нагревание) пластины. Неограниченная пластина толщиной $2S$, температура которой в начальный момент времени всюду одинакова и равна t_0, охлаждается или нагревается в жидкой или газообразной среде постоянной температуры $t_{ж}$.

Распределение температур в пластине подчиняется уравнению

$$\theta = F\left(\frac{x}{S}, \mathrm{Fo}, \mathrm{Bi}\right), \qquad (5)$$

где $\theta = \frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$ — безразмерная температура; t — температура пластины на расстоянии x от оси в момент времени τ, считая время от начала охлаждения; выражение для θ написано для случая

охлаждения пластины; при нагревании пластины

$$\theta = \frac{t_{ж} - t}{t_{ж} - t_0};$$

$\mathrm{Fo} = \frac{a\tau}{S^2}$ — безразмерное время (критерий Фурье); $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности; c — теплоемкость; γ — удельный вес материала пластины; $\mathrm{Bi} = \frac{\alpha S}{\lambda}$ — отношение внутреннего термического сопротивления пластины к внешнему (критерий Био); α — коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающей среде в *ккал/м²·час·град*; F — известная функция.

Если необходимо определить t, то, вычислив по исходным данным Bi, Fo и $\frac{x}{S}$, находят θ, а затем вычисляют t по формуле

$$t = t_{ж} + (t_0 - t_{ж})\,\theta.$$

Таблица 13

Корни характеристического уравнения $\mathrm{ctg}\ \varepsilon_n = \frac{\varepsilon_n}{\mathrm{Bi}}$ [21]

Bi	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
0	0,0000	3,1416	6,2832	9,4248	12,5664	15,7080
0,001	0,0316	3,1419	6,2833	9,4249	12,5665	15,7080
0,002	0,0447	3,1422	6,2835	9,4250	12,5665	15,7081
0,004	0,0632	3,1429	6,2838	9,4252	12,5667	15,7082
0,006	0,0774	3,1435	6,2841	9,4254	12,5668	15,7083
0,008	0,0893	3,1441	6,2845	9,4256	12,5670	15,7085
0,01	0,0998	3,1448	6,2848	9,4258	12,5672	15,7086
0,02	0,1410	3,1479	6,2864	9,4269	12,5680	15,7092
0,04	0,1987	3,1543	6,2895	9,4290	12,5696	15,7105
0,06	0,2425	3,1606	6,2927	9,4311	12,5711	15,7118
0,08	0,2791	3,1668	6,2959	9,4333	12,5727	15,7131
0,1	0,3111	3,1731	6,2991	9,4354	12,5743	15,7143
0,2	0,4328	3,2039	6,3148	9,4459	12,5823	15,7207
0,3	0,5218	3,2341	6,3305	9,4565	12,5902	15,7270
0,4	0,5932	3,2636	6,3461	9,4670	12,5981	15,7334
0,5	0,6533	3,2923	6,3616	9,4775	12,6060	15,7397
0,6	0,7051	3,3204	6,3770	9,4879	12,6139	15,7460
0,7	0,7506	3,3477	6,3923	9,4983	12,6218	15,7524
0,8	0,7910	3,3744	6,4074	9,5087	12,6296	15,7587
0,9	0,8274	3,4003	6,4224	9,5190	12,6375	15,7650
1,0	0,8603	3,4256	6,4373	9,5293	12,6453	15,7713
1,5	0,9882	3,5422	6,5097	9,5801	12,6841	15,8026
2,0	1,0769	3,6436	6,5783	9,6296	12,7223	15,8336
3,0	1,1925	3,8088	6,7040	9,7240	12,7966	15,8945
4,0	1,2646	3,9352	6,8140	9,8119	12,8678	15,9536
5,0	1,3138	4,0336	6,9096	9,8928	12,9352	16,0107
6,0	1,3496	4,1116	6,9924	9,9667	12,9988	16,0654
7,0	1,3766	4,1746	7,0640	10,0339	13,0584	16,1177
8,0	1,3978	4,2264	7,1263	10,0949	13,1141	16,1675
9,0	1,4149	4,2694	7,1806	10,1502	13,1660	16,2147
10,0	1,4289	4,3058	7,2281	10,2003	13,2142	16,2594
15,0	1,4729	4,4255	7,3959	10,3898	13,4078	16,4474
20,0	1,4961	4,4915	7,4954	10,5117	13,5420	16,5864
30,0	1,5202	4,5615	7,6057	10,6543	13,7085	16,7691
40,0	1,5325	4,5979	7,6647	10,7334	13,8048	16,8794
50,0	1,5400	4,6202	7,7012	10,7832	13,8666	16,9519
60,0	1,5451	4,6353	7,7259	10,8172	13,9094	17,0026
80,0	1,5514	4,6543	7,7573	10,8606	13,9644	17,0686
100,0	1,5552	4,6658	7,7764	10,8871	13,9981	17,1093
∞	1,5708	4,7124	7,8540	10,9956	14,1372	17,2788

Для определения τ вычисляют по исходным данным θ, Bi и $\frac{x}{S}$, затем находят Fo и, наконец, вычисляют τ по формуле

$$\tau = \mathrm{Fo}\,\frac{S^2}{a}.$$

В общем случае функция F выражается уравнением

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin\varepsilon_n}{\varepsilon_n + \sin\varepsilon_n\cos\varepsilon_n}\cos\varepsilon_n\,\frac{x}{S} \times \times \exp\left(-\varepsilon_n^2\,\mathrm{Fo}\right), \qquad (5a)$$

где ε_n — корни характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg}\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_n}{\mathrm{Bi}}$$

В табл. 13 приведены первые шесть значений ε_n.

При $\mathrm{Bi}\to\infty$ (практически при $\mathrm{Bi} > 100$)

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{(2n-1)\,\pi}\cos\frac{(2n-1)\,\pi x}{2S} \times \times \exp\left[-\frac{(2n-1)^2\pi^2}{4}\,\mathrm{Fo}\right].$$

В этом случае $t_{x=S} \to t_{ж}$.

Для малых значений критерия Био ($\mathrm{Bi} < 0{,}1$)

$$\theta = \cos\sqrt{\mathrm{Bi}}\,\frac{x}{S}\exp\left(-\mathrm{Bi}\cdot\mathrm{Fo}\right).$$

При значениях $\mathrm{Fo} \geqslant 0{,}3$ можно вычислять θ, принимая во внимание один первый член ряда; совершаемая при этом ошибка не превышает 1%. В этом случае безразмерные температуры в середине пластины

$$\theta_{сер} = \frac{t_{x=0} - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$$

и на поверхности пластины

$$\theta_{пов} = \frac{t_{x=S} - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$$

могут быть вычислены по формулам

$$\theta_{сер} = N\exp\left(-\varepsilon_1^2\,\mathrm{Fo}\right);$$

$$\theta_{пов} = P\exp\left(-\varepsilon_1^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

Величины N, P и ε_1^2 при различных значениях Bi приведены в табл. 14.

На фиг. 5 и 6 даны графики для определения

$$\theta_{сер} = F_1(\mathrm{Fo},\ \mathrm{Bi})$$

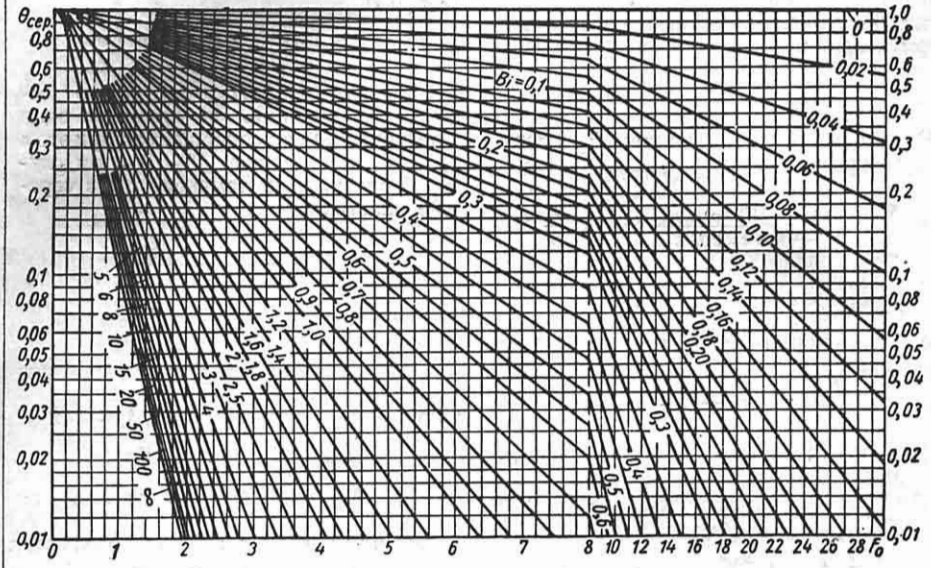
и

$$\theta_{пов} = F_2(\mathrm{Fo},\ \mathrm{Bi}).$$

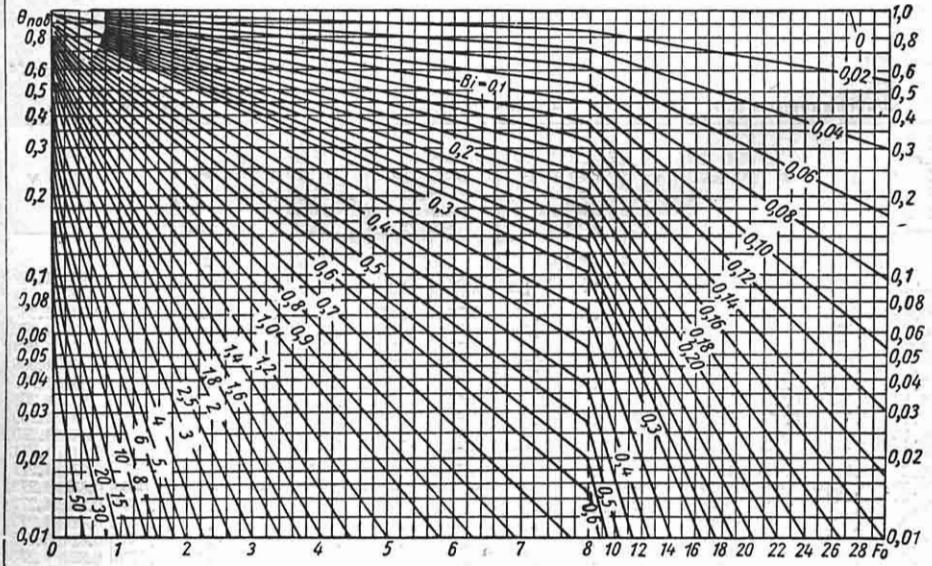
Таблица 14

Коэффициенты для расчета охлаждения или нагревания пластины толщиной 2S [14]

Критерий Био $\frac{\alpha}{\lambda}S$	ε_1^2	P	M	N	Критерий Био $\frac{\alpha}{\lambda}S$	ε_1^2	P	M	N	Критерий Био $\frac{\alpha}{\lambda}S$	ε_1^2	P	M	N
0,00	0,0000	1,000	1,000	1,000	0,55	0,4624	0,836	0,995	1,076	6,0	1,82	0,273	0,901	1,248
0,01	0,0100	0,997	1,000	1,002	0,60	0,497	0,823	0,994	1,081	7,0	1,90	0,241	0,892	1,254
0,02	0,0199	0,993	1,000	1,003	0,70	0,564	0,798	0,992	1,092	8,0	1,95	0,216	0,885	1,257
0,04	0,0397	0,987	1,000	1,006	0,80	0,626	0,774	0,990	1,102	9,0	2,00	0,196	0,879	1,260
0,06	0,0584	0,981	1,000	1,010	0,90	0,684	0,751	0,988	1,111	10	2,04	0,180	0,874	1,262
0,08	0,0778	0,974	1,000	1,013	1,00	0,740	0,729	0,986	1,119	12	2,08	0,152	0,866	1,265
0,10	0,0968	0,967	1,000	1,016	1,20	0,841	0,689	0,981	1,134	14	2,12	0,132	0,859	1,267
0,12	0,1154	0,960	1,000	1,020	1,40	0,931	0,653	0,977	1,148	16	2,16	0,116	0,855	1,268
0,14	0,1337	0,954	1,000	1,023	1,60	1,016	0,619	0,972	1,159	18	2,20	0,104	0,851	1,269
0,16	0,1518	0,948	1,000	1,026	1,80	1,090	0,587	0,968	1,169	20	2,24	0,094	0,847	1,270
0,18	0,1697	0,942	1,000	1,029	2,00	1,162	0,559	0,964	1,179	25	2,27	0,076	0,841	1,271
0,20	0,1874	0,936	1,000	1,031	2,2	1,222	0,535	0,960	1,186	30	2,30	0,065	0,836	1,271
0,22	0,2048	0,930	1,000	1,034	2,4	1,277	0,510	0,956	1,193	35	2,33	0,0560	0,832	1,272
0,24	0,2220	0,924	0,999	1,037	2,6	1,332	0,488	0,952	1,200	40	2,35	0,0500	0,829	1,272
0,26	0,2390	0,918	0,999	1,040	2,8	1,380	0,468	0,948	1,205	50	2,37	0,0400	0,826	1,272
0,28	0,2558	0,912	0,999	1,042	3,0	1,420	0,448	0,944	1,210	60	2,39	0,0333	0,824	1,273
0,30	0,2723	0,906	0,999	1,045	3,5	1,52	0,406	0,935	1,221	70	2,40	0,0286	0,822	1,273
0,35	0,3125	0,891	0,998	1,052	4,0	1,59	0,370	0,926	1,229	80	2,41	0,0250	0,820	1,273
0,40	0,3516	0,877	0,998	1,058	4,5	1,66	0,338	0,919	1,235	90	2,41	0,0222	0,819	1,273
0,45	0,3894	0,863	0,997	1,064	5,0	1,73	0,314	0,912	1,240	100	2,42	0,0200	0,818	1,273
0,50	0,4264	0,849	0,996	1,070	5,5	1,78	0,293	0,906	1,244	∞	2,467	0,0000	0,810	1,273



Фиг. 5. Безразмерная температура в середине пластины.



Фиг. 6. Безразмерная температура на поверхности пластины.

Количество тепла, которое отдает или воспринимает 1 $м^2$ пластины с обеих сторон за промежуток времени от $\tau = 0$ до τ

$$Q = 2S\gamma c\,(t_0 - \bar{t})\ \ккал/м^2,$$

где $\bar{t}$ — средняя температура пластины в момент времени τ;

$$\bar{t} = \bar{\theta}\,(t_0 - t_{ж}) + t_{ж}.$$

В общем случае

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mathrm{Bi}^2}{\varepsilon_n^2(\varepsilon_n^2 + \mathrm{Bi}^2 + \mathrm{Bi})} \exp\left(-\varepsilon_n^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

При $\mathrm{Bi} \to \infty$ (практически при $\mathrm{Bi} > 100$)

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2(2n-1)^2} \exp\left(-\varepsilon_n^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

При $\mathrm{Bi} < 0{,}1$

$$\bar{\theta} = \exp\left(-\mathrm{Bi}\cdot\mathrm{Fo}\right).$$

При значениях $\mathrm{Fo} \geqslant 0{,}3$

$$\bar{\theta} = M\cdot\exp\left(-\varepsilon_1^2\mathrm{Fo}\right).$$

Значения M даны в табл. 14. При $\mathrm{Bi} \leqslant 0{,}5$ эта формула практически пригодна с самого начала нагрева или охлаждения.

Охлаждение (нагревание) цилиндра. Бесконечный цилиндр радиусом R, температура которого в начальный момент времени всюду одинакова и равна t_0, охлаждается или нагревается в жидкой или газообразной среде постоянной температуры $t_{ж}$.

Таблица 15

Корни характеристического уравнения $\varepsilon_n J_1(\varepsilon_n) = \mathrm{Bi}\,J_0(\varepsilon_n)$ [21]

Bi	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_n
0,0	0,0000	3,8317	7,0156	10,1735	13,3237	16,4706
0,01	0,1412	3,8343	7,0170	10,1745	13,3244	16,4712
0,02	0,1995	3,8369	7,0184	10,1754	13,3252	16,4718
0,04	0,2814	3,8421	7,0213	10,1774	13,3267	16,4731
0,06	0,3438	3,8473	7,0241	10,1794	13,3282	16,4743
0,08	0,3960	3,8525	7,0270	10,1813	13,3297	16,4755
0,10	0,4417	3,8577	7,0298	10,1833	13,3312	16,4767
0,15	0,5376	3,8706	7,0369	10,1882	13,3349	16,4797
0,20	0,6170	3,8835	7,0440	10,1931	13,3387	16,4828
0,30	0,7465	3,9091	7,0582	10,2029	13,3462	16,4888
0,40	0,8516	3,9344	7,0723	10,2127	13,3537	16,4949
0,50	0,9408	3,9594	7,0864	10,2225	13,3611	16,5010
0,60	1,0184	3,9841	7,1004	10,2322	13,3686	16,5070
0,70	1,0873	4,0085	7,1143	10,2419	13,3761	16,5131
0,80	1,1490	4,0325	7,1282	10,2519	13,3835	16,5191
0,90	1,2048	4,0562	7,1421	10,2613	13,3910	16,5251
1,0	1,2558	4,0795	7,1558	10,2710	13,3984	16,5312
1,5	1,4569	4,1902	7,2233	10,3188	13,4353	16,5612
2,0	1,5994	4,2910	7,2884	10,3658	13,4719	16,5910
3,0	1,7887	4,4634	7,4103	10,4566	13,5434	16,6499
4,0	1,9081	4,6018	7,5201	10,5423	13,6125	16,7073
5,0	1,9898	4,7131	7,6177	10,6223	13,6786	16,7630
6,0	2,0490	4,8033	7,7039	10,6964	13,7414	16,8168
7,0	2,0937	4,8772	7,7797	10,7646	13,8008	16,8684
8,0	2,1286	4,9384	7,8464	10,8271	13,8566	16,9179
9,0	2,1566	4,9897	7,9051	10,8842	13,9090	16,9650
10,0	2,1795	5,0332	7,9569	10,9363	13,9580	17,0099
15,0	2,2509	5,1773	8,1422	11,1367	14,1576	17,2008
20,0	2,2880	5,2568	8,2534	11,2677	14,2983	17,3442
30,0	2,3261	5,3410	8,3771	11,4221	14,4748	17,5348
40,0	2,3455	5,3846	8,4432	11,5081	14,5774	17,6508
50,0	2,3572	5,4112	8,4840	11,5621	14,6433	17,7272
60,0	2,3651	5,4291	8,5116	11,5990	14,6889	17,7807
80,0	2,3750	5,4516	8,5466	11,6461	14,7475	17,8502
100,0	2,3809	5,4652	8,5678	11,6747	14,7834	17,8931
∞	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915	14,9309	18,0711

Распределение температур в цилиндре подчиняется уравнению

$$\frac{t-t_{ж}}{t_0-t_{ж}}=\Phi\left(\frac{\alpha R}{\lambda},\ \frac{a\tau}{R^2},\ \frac{r}{R}\right), \quad (6)$$

где t — температура цилиндра на расстоянии r от оси в момент времени τ; остальные обозначения и порядок вычисления t и τ те же, что и для пластины (см. стр. 129).

В общем случае функция Ф выражается уравнением

$$\theta=\frac{t-t_{ж}}{t_0-t_{ж}}=$$

$$=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2J_1(\varepsilon_n)}{\varepsilon_n\left[J_0^2(\varepsilon_n)+J_1^2(\varepsilon_n)\right]}\times$$

$$\times J_0\left(\varepsilon_n\frac{r}{R}\right)\exp\left(-\varepsilon_n^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

где ε_n — корни характеристического уравнения.

$$\varepsilon_n J_1(\varepsilon_n)=\mathrm{Bi}J_0(\varepsilon_n),$$

$J_0(\varepsilon_n)$ и $J_1(\varepsilon_n)$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

$$\mathrm{Fo}=\frac{a\tau}{R^2};\quad \mathrm{Bi}=\frac{\alpha R}{\lambda}.$$

Первые шесть значений ε_n приведены в табл. 15.

При $\mathrm{Bi}\to\infty$ (практически при $\mathrm{Bi}>100$)

$$\theta=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{\varepsilon_n J_1(\varepsilon_n)}J_0\left(\varepsilon_n\frac{r}{R}\right)\times$$

$$\times\exp\left(-\varepsilon_n^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

В этом случае $t_{x=R}\to t_{ж}$.

Для малых значений Bi ($\mathrm{Bi}\to 0$)

$$\theta=J_0\left(\sqrt{2\mathrm{Bi}}\,\frac{r}{R}\right)\exp\left(-2\mathrm{Bi}\,\mathrm{Fo}\right).$$

При значениях $\mathrm{Fo}\geqslant 0{,}25$, совершая ошибку, не превышающую 1%, можно вычислять θ, ограничиваясь одним первым членом ряда. В этом случае безразмерные температуры на оси и на поверхности цилиндра могут быть вычислены по формулам

$$\theta_{оси}=N_0\exp\left(-\varepsilon_1^2\,\mathrm{Fo}\right);$$

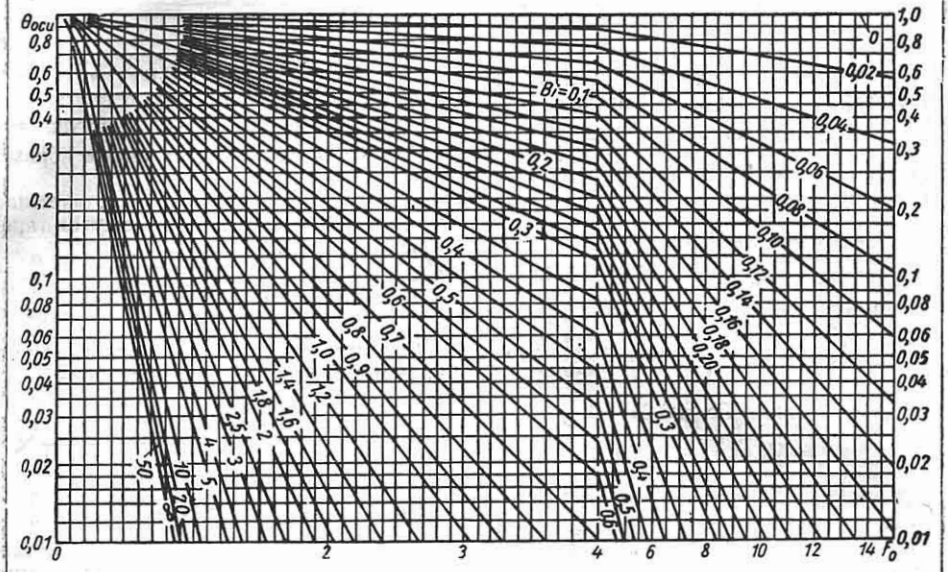
$$\theta_{пов}=P_0\exp\left(-\varepsilon_1^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

Величины N_0, P_0 и ε_1^2 для различных значений Bi приведены в табл. 16.

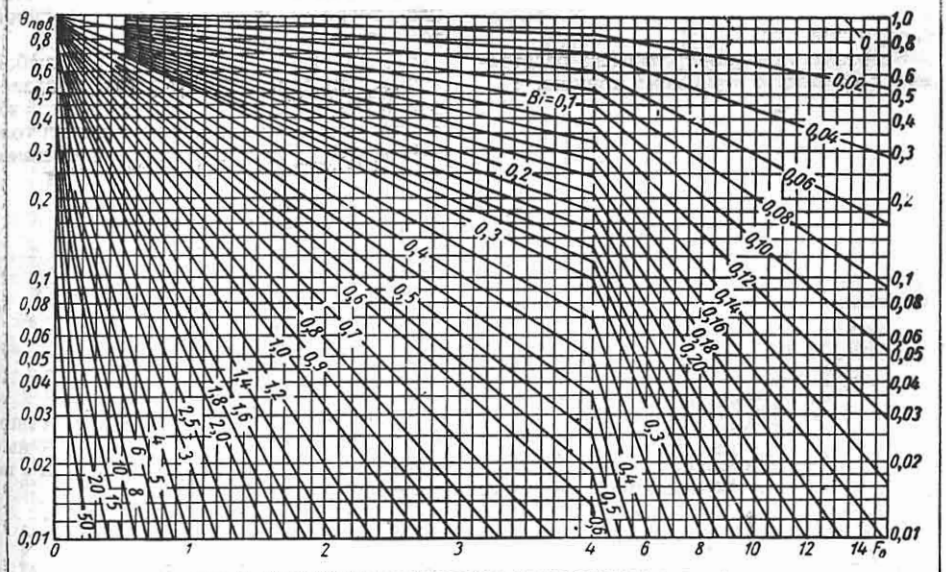
Таблица 16

Коэффициенты для расчета охлаждения или нагревания длинного цилиндра радиусом R [14]

Критерий Био $\frac{\alpha}{\lambda}R$	ε_1^2	P_0	M_0	N_0	Критерий Био $\frac{\alpha}{\lambda}R$	ε_1^2	P_0	M_0	N_0	Критерий Био $\frac{\alpha}{\lambda}R$	ε_1^2	P_0	M_0	N_0
0,00	0,0000	1,000	1,000	1,000	0,55	0,962	0,869	0,995	1,124	6,0	4,20	0,299	0,854	1,527
0,01	0,0200	0,998	1,000	1,002	0,60	1,036	0,858	0,993	1,134	7,0	4,38	0,262	0,837	1,541
0,02	0,0398	0,995	1,000	1,005	0,70	1,184	0,836	0,991	1,154	8,0	4,53	0,234	0,823	1,551
0,04	0,0792	0,990	1,000	1,010	0,80	1,322	0,815	0,989	1,172	9,0	4,65	0,210	0,812	1,560
0,06	0,1183	0,985	1,000	1,014	0,90	1,453	0,795	0,987	1,190	10	4,75	0,191	0,803	1,566
0,08	0,1569	0,980	1,000	1,019	1,00	1,580	0,774	0,985	1,208	12	4,92	0,161	0,788	1,575
0,10	0,1951	0,975	1,000	1,024	1,20	1,81	0,738	0,979	1,239	14	5,03	0,137	0,776	1,581
0,12	0,2329	0,970	1,000	1,029	1,40	2,03	0,704	0,973	1,268	16	5,12	0,120	0,768	1,585
0,14	0,2704	0,965	1,000	1,034	1,60	2,22	0,671	0,967	1,295	18	5,18	0,106	0,761	1,588
0,16	0,3075	0,960	1,000	1,039	1,80	2,39	0,639	0,961	1,319	20	5,24	0,095	0,755	1,590
0,18	0,3443	0,956	1,000	1,044	2,00	2,55	0,610	0,955	1,340	25	5,34	0,076	0,744	1,595
0,20	0,3807	0,951	1,000	1,048	2,2	2,70	0,584	0,949	1,357	30	5,41	0,065	0,736	1,598
0,22	0,4167	0,946	0,999	1,053	2,4	2,84	0,558	0,943	1,375	35	5,46	0,0560	0,730	1,600
0,24	0,4524	0,941	0,999	1,057	2,6	2,97	0,534	0,937	1,392	40	5,50	0,0500	0,725	1,602
0,26	0,4877	0,937	0,999	1,062	2,8	3,09	0,513	0,931	1,406	50	5,55	0,0400	0,719	1,603
0,28	0,5226	0,932	0,999	1,067	3,0	3,20	0,492	0,925	1,420	60	5,59	0,0333	0,714	1,604
0,30	0,5572	0,927	0,999	1,071	3,5	3,44	0,446	0,910	1,449	70	5,62	0,0286	0,710	1,604
0,35	0,642	0,915	0,998	1,082	4,0	3,64	0,407	0,896	1,472	80	5,64	0,0250	0,707	1,605
0,40	0,726	0,903	0,998	1,093	4,5	3,81	0,374	0,884	1,489	90	5,66	0,0222	0,705	1,605
0,45	0,806	0,891	0,997	1,103	5,0	3,96	0,345	0,873	1,504	100	5,68	0,0200	0,704	1,606
0,50	0,888	0,880	0,996	1,114	5,5	4,09	0,320	0,863	1,516	∞	5,787	0,0000	0,691	1,606



Фиг. 7. Безразмерная температура на оси цилиндра.



Фиг 8. Безразмерная температура на поверхности цилиндра.

На фиг. 7 и 8 даны графики для определения

$\theta_{оси} = \Phi_1(\mathrm{Fo}, \mathrm{Bi})$ и $\theta_{пов} = \Phi_2(\mathrm{Fo}, \mathrm{Bi})$.

Количество тепла, которое отдает или воспринимает цилиндр на 1 *м* длины за промежуток времени от 0 до τ,

$$Q = \pi R^2 \gamma c\,(t_0 - \bar{t})\ \text{ккал/м},$$

где $\bar{t}$ — средняя температура цилиндра в момент времени τ:

$$\bar{t} = \bar{\theta}\,(t_0 - t_{ж}) + t_{ж}.$$

В общем случае

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\mathrm{Bi}^2}{\left(\varepsilon_n^2 + \mathrm{Bi}^2\right)\varepsilon_n^2} \exp\left(-\varepsilon_n^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

При значениях $\mathrm{Fo} \geqslant 0{,}25$

$$\bar{\theta} = M_0 \exp\left(-\varepsilon_1^2\,\mathrm{Fo}\right).$$

Значения M_0 даны в табл. 16. При $\mathrm{Bi} \leqslant 0{,}5$ это уравнение практически пригодно с самого начала нагревания или охлаждения.

Охлаждение (нагревание) шара. Для шара радиусом R, охлаждаемого в среде постоянной температуры ($t_{ж}$) при равномерном начальном распределении температур, расчетные формулы имеют следующий вид.

Безразмерная температура на расстоянии r от центра в момент времени τ

$$\frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\,(\sin\varepsilon_n - \varepsilon_n \cos\varepsilon_n)}{\varepsilon_n - \sin\varepsilon_n \cos\varepsilon_n} \times$$

$$\times \frac{1}{\varepsilon_n} \frac{R}{r} \sin\left(\varepsilon_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\varepsilon_n^2 \mathrm{Fo}\right),$$

где ε_n — корни характеристического уравнения

$$\operatorname{tg}\varepsilon_n = -\frac{\varepsilon_n}{\mathrm{Bi} - 1};$$

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha R}{\lambda};\quad \mathrm{Fo} = \frac{a\tau}{R^2}.$$

Значения ε_n приведены в табл. 17.

При $\mathrm{Bi} \to \infty$ (практически при $\mathrm{Bi} > 100$)

$$\frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \sum_{n=1}^{\infty} 2\,(-1)^{n+1} \frac{1}{\pi n} \times$$

$$\times \frac{R}{r} \sin\left(\pi n \frac{r}{R}\right) \exp\left[-(\pi n)^2\,\mathrm{Fo}\right].$$

При $\mathrm{Bi} \to 0$

$$\frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \frac{1}{\sqrt{3\,\mathrm{Bi}}} \times$$

$$\times \frac{R}{r} \sin\left(\sqrt{3\,\mathrm{Bi}}\,\frac{r}{R}\right) \exp\left(-3\mathrm{Bi}\,\mathrm{Fo}\right).$$

При значениях $\mathrm{Fo} > 0{,}25$ можно вычислять θ, ограничиваясь одним первым членом ряда.

Количество тепла, которое отдает или воспринимает шар за промежуток времени от 0 до τ,

$$Q = \frac{4}{3}\pi R^3 \gamma c\,(t_0 - \bar{t}).$$

Средняя температура шара в момент времени τ находится из уравнения

$$\frac{\bar{t} - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\mathrm{Bi}^2}{\varepsilon_n^2\left(\varepsilon_n^2 + \mathrm{Bi}^2 - \mathrm{Bi}\right)} \times$$

$$\times \exp\left(-\varepsilon_n^2 \mathrm{Fo}\right).$$

Охлаждение (нагревание) параллелепипеда и цилиндра конечной длины. Прямоугольный параллелепипед со сторонами $2S_x$, $2S_y$ и $2S_z$, температура которого в начальный момент времени всюду одинакова и равна t_0, охлаждается или нагревается в среде постоянной температуры $t_{ж}$.

Безразмерная температура в любой точке параллелепипеда равна произведению безразмерных температур (в той же точке) трех неограниченных пластин толщиной $2S_x$, $2S_y$ и $2S_z$, пересечением которых образован параллелепипед

$$\frac{t(x, y, z, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} =$$

$$= \frac{t(x, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} \cdot \frac{t(y, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} \times$$

$$\times \frac{t(z, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}.$$

Таким образом, распределение температуры в параллелепипеде в различные моменты времени можно вычислить по формуле

$$\frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = F\left(\frac{x}{S_x}, \frac{a\tau}{S_x^2}, \frac{\alpha S_x}{\lambda}\right) \times$$

$$\times F\left(\frac{y}{S_y}, \frac{a\tau}{S_y^2}, \frac{\alpha S_y}{\lambda}\right) \times F\left(\frac{z}{S_z}, \frac{a\tau}{S_z^2}, \frac{\alpha S_z}{\lambda}\right),$$

Таблица 17

Корни характеристического уравнения $\operatorname{tg} \varepsilon_n = -\frac{\varepsilon_n}{\mathrm{Bi} - 1}$ [21]

Bi	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
0,0	0,0000	4,4934	7,7253	10,9041	14,0662	17,2208
0,005	0,1224	4,4945	7,7259	10,9046	14,0666	17,2210
0,01	0,1730	4,4956	7,7265	10,9050	14,0669	17,2213
0,02	0,2445	4,4979	7,7278	10,9060	14,0676	17,2219
0,03	0,2991	4,5001	7,7291	10,9069	14,0683	17,2225
0,04	0,3450	4,5023	7,7304	10,9078	14,0690	17,2231
0,05	0,3854	4,5045	7,7317	10,9087	14,0697	17,2237
0,06	0,4217	4,5068	7,7330	10,9096	14,0705	17,2242
0,07	0,4551	4,5090	7,7343	10,9105	14,0712	17,2248
0,08	0,4860	4,5112	7,7356	10,9115	14,0719	17,2251
0,09	0,5150	4,5134	7,7369	10,9124	14,0726	17,2260
0,10	0,5423	4,5157	7,7382	10,9133	14,0733	17,2266
0,15	0,6609	4,5268	7,7447	10,9179	14,0769	17,2295
0,20	0,7593	4,5379	7,7511	10,9225	14,0804	17,2324
0,30	0,9208	4,5601	7,7641	10,9316	14,0875	17,2382
0,40	1,0528	4,5822	7,7770	10,9408	14,0946	17,2440
0,50	1,1656	4,6042	7,7899	10,9499	14,1017	17,2498
0,60	1,2644	4,6261	7,8028	10,9591	14,1088	17,2556
0,70	1,3525	4,6479	7,8156	10,9682	14,1159	17,2614
0,80	1,4320	4,6696	7,8284	10,9774	14,1230	17,2672
0,90	1,5044	4,6911	7,8412	10,9865	14,1301	17,2730
1,0	1,5708	4,7124	7,8540	10,9956	14,1372	17,2788
1,1	1,6320	4,7335	7,8667	11,0047	14,1443	17,2845
1,2	1,6887	4,7544	7,8794	11,0137	14,1513	17,2903
1,3	1,7414	4,7751	7,8920	11,0228	14,1634	17,2961
1,4	1,7906	4,7956	7,9046	11,0318	14,1654	17,3019
1,5	1,8366	4,8158	7,9171	11,0409	14,1724	17,3076
1,6	1,8798	4,8358	7,9295	11,0498	14,1795	17,3134
1,7	1,9203	4,8556	7,9419	11,0588	14,1865	17,3192
1,8	1,9586	4,8751	7,9542	11,0677	14,1935	17,3249
1,9	1,9947	4,8943	7,9665	11,0767	14,2005	17,3306
2,0	2,0288	4,9132	7,9787	11,0856	14,2075	17,3364
2,5	2,1746	5,0037	8,0385	11,1296	14,2421	17,3649
3,0	2,2889	5,0870	8,0962	11,1727	14,2764	17,3932
4,0	2,4557	5,2329	8,2045	11,2560	14,3434	17,4490
5,0	2,5704	5,3540	8,3029	11,3349	14,4080	17,5034
6,0	2,6537	5,4544	8,3914	11,4086	14,4699	17,5562
7,0	2,7165	5,5378	8,4703	11,4773	14,5288	17,6072
8,0	2,7654	5,6078	8,5406	11,5408	14,5847	17,6567
9,0	2,8044	5,6669	8,6031	11,5994	14,6374	17,7032
10,0	2,8363	5,7172	8,6587	11,6532	14,6870	17,7481
11,0	2,8628	5,7606	8,7083	11,7027	14,7335	17,7908
16,0	2,9476	5,9080	8,8898	11,8959	14,9251	17,9742
21,0	2,9930	5,9921	9,0019	12,0250	15,0625	18,1136
31,0	3,0406	6,0831	9,1294	12,1807	15,2380	18,3018
41,0	3,0651	6,1311	9,1987	12,2688	15,3417	18,4180
51,0	3,0801	6,1606	9,2420	12,3247	15,4090	18,4953
61,0	3,0901	6,1805	9,2715	12,3632	15,4559	18,5497
81,0	3,1028	6,2058	9,3089	12,4124	15,5164	18,6209
101,0	3,1105	6,2211	9,3317	12,4426	15,5537	18,6650
∞	3,1416	6,2832	9,4248	12,5664	15,7080	18,8496

где t — температура в точке параллелепипеда, имеющей координаты x, y и z в момент времени τ.

Функции F определяются по соответствующим формулам и графикам для охлаждения (нагревания) неограниченной пластины.

Для стержня прямоугольного сечения со сторонами $2S_x$ и $2S_y$ в правой части уравнения выпадает последний сомножитель, а для стержня квадратного сечения со стороной $2S$ это уравнение принимает вид

$$\frac{t-t_{ж}}{t_0-t_{ж}} = F\left(\frac{x}{S}, \frac{a\tau}{S^2}, \frac{\alpha S}{\lambda}\right) \times$$

$$\times F\left(\frac{y}{S}, \frac{a\tau}{S^2}, \frac{\alpha S}{\lambda}\right).$$

Цилиндр (в том числе и диск) радиусом R и длиной $2S$, температура которого в начальный момент времени всюду одинакова и равна t_0, охлаждается или нагревается в среде постоянной температуры $t_{ж}$.

Безразмерная температура цилиндра в точке с координатами x и r в момент времени τ вычисляется по формуле

$$\frac{t-t_{ж}}{t_0-t_{ж}} = \Phi\left(\frac{r}{R}, \frac{a\tau}{R^2}, \frac{\alpha R}{\lambda}\right) \times$$

$$\times F\left(\frac{x}{S}, \frac{a\tau}{S^2}, \frac{\alpha S}{\lambda}\right).$$

Функция Ф определяется по соответствующим формулам и графикам для охлаждения (нагревания) бесконечного цилиндра, а функция F — по формулам и графикам для неограниченной пластины.

Расчет процессов теплопроводности в других случаях рассмотрен в [21], [14], [36]. Для тел сложной конфигурации или анизотропных, когда аналитический расчет затруднителен, пользуются численными методами расчета (см., например, [6]), или же производят вычисления с помощью гидро- или электроинтеграторов.

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Основные положения

Различают конвективный теплообмен в однофазной среде и при изменении агрегатного состояния жидкости (или пара). По другому признаку различают конвективный теплообмен при вынужденном движении жидкости или газа (вынужденная конвекция) и свободном движении (естественная конвекция). Вынужденным называют движение жидкости (газа), обусловленное внешними силами; свободным — движение, обусловленное неравномерным распределением плотности жидкости (газа) в поле силы тяжести в связи с протеканием процесса теплообмена (температурное поле, изменение агрегатного состояния).

На поверхности твердого тела жидкость неподвижна. Поэтому через границу раздела жидкость — стенка тепло передается только теплопроводностью жидкости.

Плотность теплового потока от жидкости к поверхности тела или в противоположном направлении

$$q = -\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_c \; ккал/м^2 \cdot час,$$

где λ — коэффициент теплопроводности жидкости; $\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_c$ — градиент температуры в жидкости на поверхности тела (стенки).

Поток тепла через поверхность

$$Q = \int_F q dF = -\int_F \lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_c \cdot dF,$$

где F — поверхность, через которую происходит теплообмен (поверхность теплообмена).

Средний по поверхности теплообмена коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot \Delta t} = \frac{\bar{q}}{\Delta t} \; ккал/м^2 \cdot час \cdot град,$$

где $\bar{q} = \frac{Q}{F}$ — средняя по поверхности обтекаемого тела или канала плотность теплового потока или средняя тепловая нагрузка в $ккал/м^2 \cdot час$; Δt — температурный напор, т. е. разность температур между поверхностью теплообмена и омывающей ее жидкостью.

Различают:

а) начальный температурный напор

$$\Delta t_н = t_c - t_{ж1},$$

б) средний арифметический температурный напор

$$\Delta \bar{t}_a = t_c - \frac{1}{2}(t_{ж1} + t_{ж2});$$

в) средний логарифмический температурный напор

$$\Delta\bar{t}_л = \frac{t_{ж2} - t_{ж1}}{\ln \dfrac{t_c - t_{ж1}}{t_c - t_{ж2}}}.$$

Здесь t_c — постоянная или средняя по поверхности температура стенки канала или обтекаемого тела в °С; $t_{ж1}$ — средняя температура жидкости при входе в канал или температура набегающего потока вдали от обтекаемого тела в °С; $t_{ж2}$ — средняя температура жидкости при выходе из канала в °С.

В зависимости от того, по какой формуле вычисляется температурный напор, который входит в знаменатель выражения для α, говорят, что α отнесен к $\Delta t_н$, $\Delta\bar{t}_a$ или $\Delta\bar{t}_л$.

Процесс конвективного теплообмена выражается математически системой дифференциальных уравнений, которые позволяют определить поле температуры, а также поле скорости и поле давления в движущейся жидкости. Для однородной, несжимаемой вязкой жидкости с постоянными физическими свойствами (исключая плотность, которая считается зависящей от температуры) без учета теплоты трения уравнения конвективного теплообмена имеют вид:

уравнение энергии

$$\frac{dt}{d\tau} = a\nabla^2 t;$$

уравнения движения

$$\frac{dw_x}{d\tau} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\nabla^2 w_x;$$

$$\frac{dw_y}{d\tau} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\nabla^2 w_y;$$

$$\frac{dw_z}{d\tau} = g\beta\,(t - t_ж) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\nabla^2 w_z;$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$$

(ось z направлена вертикально).

В этих уравнениях t — температура; τ — время; $a = \dfrac{\lambda}{c_p\gamma}$ — коэффициент температуропроводности жидкости; w_x, w_y, w_z — проекции вектора скорости на оси x, y, z; g — ускорение силы тяжести; ρ — плотность; ν — кинематический коэффициент вязкости; β — коэффициент объемного расширения жидкости; $t_ж$ — постоянная температура жидкости вдали от тела;

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x\frac{\partial t}{\partial x} + w_y\frac{\partial t}{\partial y} + w_z\frac{\partial t}{\partial z};$$

аналогичным образом составляются выражения для полных производных w_x, w_y и w_z.

Для решения конкретных задач формулируются условия однозначности.

Условия однозначности стационарных процессов конвективного теплообмена задают:

1) геометрическую форму и размеры поверхности теплообмена;

2) значения физических параметров жидкости: a, ρ, ν, β, λ;

3) распределение температуры и скорости на поверхности теплообмена (на неподвижной поверхности $w = 0$) и во входном сечении канала или вдали от тела.

Решение уравнений конвективного теплообмена при соответствующих условиях однозначности позволяет определить температурное поле, т. е. зависимость $t = f(x, y, z)$ (для стационарных процессов), и по формулам, приведенным на стр. 138, вычислить q, Q и α.

При экспериментальном изучении процессов конвективного теплообмена опытные данные обрабатывают в критериях подобия (см. стр. 138). Из выражений для Q и α, уравнений конвективного теплообмена и условий однозначности следует, что

$$\bar{q} = f(\Delta t,\ w,\ \beta\cdot g\cdot\Delta t,\ \lambda,\ a,\ \nu,\ l_0,\ l_1,\ l_2).$$

Применение π-теоремы дает

$$\frac{\alpha\cdot l_0}{\lambda} =$$

$$= f\left(\frac{wl_0}{\nu},\ \frac{gl_0^3\beta\Delta t}{\nu^2},\ \frac{wl_0}{a},\ \frac{l_1}{l_0},\ \frac{l_2}{l_0}\right)$$

или

$$\mathrm{Nu} = f\left(\mathrm{Re},\ \mathrm{Gr},\ \mathrm{Pe},\ \frac{l_1}{l_0},\ \frac{l_2}{l_0}\right). \quad (7)$$

Это уравнение справедливо для процессов конвективного теплообмена в

однофазной несжимаемой жидкости, физические параметры которой, кроме плотности, не зависят от температуры.

В последнем уравнении содержатся следующие критерии подобия:

критерий теплоотдачи (Нуссельта)

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha l_0}{\lambda}, \qquad (8)$$

характеризующий интенсивность теплообмена на границе жидкость — стенка;

вязкостно-инерционный критерий (Рейнольдса)

$$\mathrm{Re} = \frac{wl_0}{\nu}, \qquad (9)$$

характеризующий отношение сил инерции и сил вязкости в потоке жидкости;

критерий подъемной силы (Грасгофа)

$$\mathrm{Gr} = \frac{gl_0^3\beta\Delta t}{\nu^2}, \qquad (10)$$

характеризующий взаимодействие подъемных сил и сил вязкости;

критерий конвективного теплообмена (Пекле)

$$\mathrm{Pe} = \frac{wl_0}{a}, \qquad (11)$$

характеризующий отношение конвективных и кондуктивных потоков тепла при конвективном теплообмене;

критерии геометрического подобия

$$\frac{l_1}{l_0} \text{ и } \frac{l_2}{l_0}.$$

Отношение Pe к Re называется критерием физических свойств (Прандтля)

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mathrm{Pe}}{\mathrm{Re}} = \frac{\nu}{a} \qquad (12)$$

и характеризует теплофизические свойства жидкости.

В формулах (7) — (12):

α — средний коэффициент теплоотдачи в *ккал/м²·час·град*; l_0 — характерный линейный размер канала или обтекаемого тела в *м* (l_1 и l_2 — другие размеры тела); w — скорость жидкости или газа в *м/сек*; в трубах и каналах это обычно средняя скорость, при внешнем обтекании тел — скорость набегающего потока вдали от тела; Δt — разность между температурой стенки и температурой жидкости (газа); λ — коэффициент теплопроводности в *ккал/м·час·град*; a — коэффициент температуропроводности в *м²/сек*; β — температурный коэффициент объемного расширения в $\frac{1}{град}$; $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ — кинематический коэффициент вязкости в *м²/сек*; μ — динамический коэффициент вязкости в *кГ·сек/м²*; $\rho = \frac{\gamma}{g}$ — плотность в *кГ·сек²/м⁴*; γ — удельный вес жидкости (газа) в *кГ/м³*.

Температурный коэффициент объемного расширения жидкости (газа)

$$\beta = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p \frac{1}{град},$$

где v — удельный объем жидкости (газа) при температуре t и постоянном давлении p. Для газа, если его можно рассматривать как совершенный газ,

$$\beta = \frac{1}{273 + t_{ж}} \frac{1}{град}.$$

Средняя величина β для капельных жидкостей в интервале температур от $t_{ж}$ до t_c

$$\beta \approx \frac{\gamma_{ж} - \gamma_c}{\gamma_{ж}(t_c - t_{ж})},$$

где $\gamma_{ж}$ и γ_c — удельные веса жидкости при ее температуре вдали от стенки $t_{ж}$ и температуре стенки t_c.

Зависимость (7) для конкретных процессов теплообмена определяется из опыта и представляется в виде эмпирических формул, которые позволяют определить коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda}{l_0}\cdot\mathrm{Nu} = f\left(\mathrm{Re},\ \mathrm{Gr},\ \mathrm{Pe},\ \frac{l_1}{l_0},\ \frac{l_2}{l_0}\right).$$

Температура, при которой выбираются значения физических параметров, содержащихся в критериях подобия, называется определяющей и в дальнейшем обозначается буквой $t_{оп}$.

Способы определения w, Δt, l_0 и $t_{оп}$, а также температурного напора, к которому отнесен α, указаны в дальнейшем для каждого конкретного случая.

Эмпирическими формулами можно пользоваться только в том диапазоне изменения определяющих критериев, который имел место в опытах. Поэтому в дальнейшем для каждой формулы указаны крайние значения критериев, в пределах которых эта формула справедлива. При вычислении критериев все величины должны быть выражены в одной и той же системе единиц измерения.

Физические параметры жидкостей, газов и паров даны в табл. 8 — 12 и 18—21.

Таблица 18

Физические параметры воды на кривой насыщения

t в °С	γ' в $кГ/м^3$	$\beta \cdot 10^4$ в $\frac{1}{град}$	i' в $ккал/кГ$	λ в $ккал/м\ час \cdot град$	$a \cdot 10^4$ в $м^2/час$	$\mu \cdot 10^6$ в $кГ \cdot сек/м^2$	$\nu \cdot 10^6$ в $м^2/сек$	Pr	$\sigma \cdot 10^4$ в $кГ/м$
0	999,8	—0,7	0	0,474	4,71	182,5	1,790	13,7	77,1
10	999,6	0,95	10,04	0,494	4,94	133,0	1,300	9,5	75,6
20	998,2	2,1	20,04	0,515	5,16	102,0	1,000	7,0	74,1
30	995,6	3,0	30,02	0,531	5,35	81,7	0,805	5,4	72,6
40	992,2	3,9	40,01	0,545	5,51	66,6	0,659	4,3	71,0
50	988,0	4,6	49,99	0,557	5,66	56,0	0,556	3,55	69,1
60	983,2	5,3	59,98	0,567	5,79	48,0	0,479	3,00	67,5
70	977,7	5,8	69,98	0,574	5,89	41,4	0,415	2,55	65,6
80	971,8	6,3	80,00	0,580	5,97	36,3	0,366	2,25	63,8
90	965,3	7,0	90,04	0,585	6,03	32,1	0,326	1,95	61,9
100	958,3	7,5	100,10	0,587	6,08	28,8	0,295	1,75	60,0
110	951,0	8,0	110,19	0,589	6,12	26,0	0,268	1,57	58,0
120	943,1	8,5	120,3	0,590	6,15	23,5	0,244	1,43	55,9
130	934,8	9,1	130,5	0,590	6,18	21,6	0,226	1,32	53,9
140	926,1	9,7	140,7	0,589	6,20	20,0	0,212	1,23	51,7
150	916,9	10,3	151,0	0,588	6,21	18,9	0,202	1,17	49,6
160	907,4	10,8	161,3	0,587	6,21	17,7	0,191	1,10	47,5
170	897,3	11,5	171,8	0,584	6,20	16,6	0,181	1,05	45,2
180	886,9	12,1	182,3	0,580	6,19	15,6	0,173	1,01	43,1
190	876,0	12,8	192,9	0,576	6,16	14,8	0,166	0,97	40,8
200	864,7	13,5	203,6	0,570	6,11	14,1	0,160	0,95	38,4
210	852,8	14,3	214,4	0,563	6,06	13,4	0,154	0,92	36,1
220	840,3	15,2	225,4	0,555	6,00	12,8	0,149	0,90	33,8
230	827,3	16,2	236,5	0,548	5,92	12,2	0,145	0,88	31,6
240	813,6	17,2	247,8	0,540	5,84	11,7	0,141	0,86	29,1
250	799,2	18,6	259,3	0,531	5,74	11,2	0,137	0,86	26,7
260	784,0	20,0	271,1	0,520	5,62	10,8	0,135	0,86	24,2
270	767,9	21,7	283,1	0,507	5,48	10,4	0,133	0,87	21,9
280	750,7	23,8	295,4	0,494	5,30	10,0	0,131	0,89	19,5
290	732,3	26,5	308,1	0,480	5,05	9,6	0,129	0,92	17,2
300	712,5	29,5	321,2	0,464	4,75	9,3	0,128	0,98	14,7
310	690,6	33,5	334,9	0,446	4,40	9,0	0,128	1,05	12,3
320	667,1	38,0	349,2	0,425	4,05	8,7	0,128	1,13	10,0
330	640,2	42,5	364,5	0,402	3,65	8,3	0,127	1,25	7,82
340	609,4	47,5	380,9	0,376	3,15	7,9	0,127	1,45	5,78
350	572,0	—	399,2	0,344	2,75	7,4	0,127	1,67	3,89
360	524,0	—	420,7	0,306	2,40	6,8	0,127	1,91	2,06
370	448,0	—	452,0	0,252	2,10	5,8	0,127	2,18	0,48

Таблица 19

Физические параметры сухого воздуха при $p = 1$ кГ/см²
(коэффициенты вязкости и теплопроводность приняты по данным ВТИ) [11]

t в °С	γ в кГ/м³	c_p в ккал/кГ·град	$\lambda \cdot 10^2$ в ккал/м·час·град	$a \cdot 10^2$ в м²/час	$\mu \cdot 10^6$ в кГ·сек/м²	$\nu \cdot 10^6$ в м²/сек	Pr
−50	1,532	0,239	1,76	4,81	1,482	9,490	0,71
−20	1,350	0,240	1,96	6,05	1,647	11,97	0,71
0	1,251	0,240	2,096	6,98	1,753	13,75	0,71
10	1,207	0,240	2,16	7,46	1,804	14,66	0,71
20	1,166	0,240	2,22	7,93	1,855	15,61	0,71
30	1,127	0,240	2,28	8,43	1,905	16,58	0,71
40	1,091	0,240	2,34	8,94	1,954	17,57	0,71
50	1,057	0,240	2,40	9,46	2,002	18,58	0,71
60	1,026	0,241	2,46	9,95	2,050	19,60	0,71
70	0,996	0,241	2,51	10,5	2,097	20,65	0,71
80	0,967	0,241	2,57	11,0	2,143	21,74	0,71
90	0,941	0,241	2,63	11,6	2,189	22,82	0,71
100	0,916	0,241	2,68	12,1	2,233	23,91	0,71
120	0,869	0,242	2,79	13,3	2,322	26,21	0,71
140	0,827	0,243	2,90	14,4	2,408	28,66	0,71
160	0,789	0,243	3,00	15,6	2,492	31,01	0,71
180	0,754	0,244	3,11	16,9	2,574	33,49	0,71
200	0,7220	0,245	3,22	18,2	2,652	36,03	0,71
250	0,6530	0,247	3,49	21,6	2,846	42,75	0,71
300	0,5960	0,250	3,76	25,2	3,030	49,87	0,71
350	0,5482	0,252	3,99	28,8	3,204	57,33	0,72
400	0,5075	0,255	4,22	32,6	3,374	65,22	0,72
500	0,4418	0,261	4,69	40,7	3,686	81,85	0,72
600	0,3912	0,266	5,14	49,4	3,982	99,86	0,73
700	0,3510	0,271	5,56	58,4	4,256	118,95	0,73
800	0,3183	0,276	6,02	68,5	4,516	139,18	0,73
900	0,2916	0,280	6,36	77,9	4,760	160,14	0,74
1000	0,2683	0,283	6,74	88,8	4,996	182,67	0,74
1100	0,2487	0,286	7,10	99,8	5,221	205,94	0,74
1200	0,2319	0,289	7,45	111,2	5,441	230,17	0,74

Таблица 20

Динамический коэффициент вязкости воды и водяного пара $\mu \cdot 10^6$ в кГ·сек/м²
(по данным Д. Л. Тимрота, обработанным В. Н. Тимофеевым) [9]

t в °С	$\mu_{нас}$	p в кГ/см²				
		1	20	100	200	300
100	—	1,231	28,8	29,3	30,0	31,0
120	—	1,312	23,5	24,0	24,6	25,3
140	—	1,393	20,1	20,6	21,1	21,8
160	1,551	1,474	17,6	18,1	18,5	19,1
180	1,640	1,555	15,7	16,0	16,3	16,8
200	1,733	1,636	14,1	14,3	14,6	14,9
220	1,828	1,717	1,723	13,0	13,2	13,5
240	1,930	1,797	1,805	11,9	12,1	12,3
260	2,039	1,878	1,887	10,9	11,1	11,3
280	2,157	1,959	1,969	10,1	10,3	10,5
300	2,293	2,039	2,050	9,4	9,6	9,9
350	2,818	2,238	2,253	2,331	7,5	8,2
370	3,454	2,318	2,334	2,415	2,84	7,2
400	—	2,437	2,454	2,541	2,732	4,6
450	—	2,633	2,653	2,751	2,928	3,4
500	—	2,827	2,850	2,960	3,141	3,408
550	—	3,018	3,045	3,167	3,359	3,617
600	—	3,208	3,237	3,371	3,576	3,841

Таблица 21

Динамический коэффициент вязкости газов по данным ВТИ [11]

t в °С	$\mu \cdot 10^6$ кГ·сек/м²								
	CO_2	Воздух	H_2O	N_2	O_2	Дымовые газы ($CO_2 = 13\%$) при содержании H_2O в %			
						5	11	17	23
0	1,411	1,753	0,833	1,698	1,980	1,663	1,608	1,5533	1,496
100	1,880	2,233	1,231	2,141	2,508	2,139	2,077	2,018	1,967
200	2,304	2,652	1,635	2,525	2,966	2,557	2,495	2,435	2,373
300	2,691	3,030	2,039	2,870	3,375	2,935	2,877	2,819	2,762
400	3,048	3,374	2,436	3,180	3,748	3,283	3,228	3,173	3,118
500	3,379	3,686	2,825	3,471	4,091	3,598	3,548	3,498	3,445
600	3,690	3,982	3,206	3,736	4,411	3,904	3,858	3,812	3,765
700	3,982	4,256	3,578	3,986	4,712	4,187	4,146	4,105	4,063
800	4,256	4,516	3,940	4,220	5,095	4,454	4,419	4,384	4,353
900	4,521	4,760	4,292	4,445	5,260	4,707	4,677	4,644	4,616
1000	4,770	4,996	4,633	4,663	5,517	4,952	4,927	4,897	4,878
1100	5,010	5,221	4,969	4,867	5,765	5,187	5,166	5,140	5,125
1200	5,240	5,441	5,296	5,066	6,001	5,415	5,399	5,377	5,361

Примерные значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией в *ккал/м²·час·град* в различных условиях:

Газы при естественной конвекции	5 ÷ 30
Вода при естественной конвекции	100 ÷ 1000
Газы при движении в трубах или между трубами	10 ÷ 300
Вода при движении в трубах	500 ÷ 10000
Кипение воды (пузырчатое)	2000 ÷ 40000
Пленочная конденсация водяного пара	4000 ÷ 15000
Капельная конденсация водяного пара	30 000 ÷ 120000
Конденсация паров органических жидкостей	500 ÷ 2000

Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

Теплоотдача при течении в трубах и каналах. При ламинарном течении жидкости (газа) в прямых круглых трубах и каналах постоянного сечения различают *вязкостный* режим течения, отвечающий значениям $Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^5$, и *вязкостно-гравитационный* режим течения, отвечающий значениям $Gr \cdot Pr > 5 \cdot 10^5$.

При вязкостном режиме течения жидкости в круглых трубах и прямоугольных каналах расчет теплоотдачи производится по формулам, полученным в МЭИ [29]:

при охлаждении жидкости

$$Nu = 5{,}25C\left(Pe\,\frac{d}{l}\right)^{1/3} Pr^{-0{,}2}\left(\frac{\mu_c}{\mu_{ж}}\right)^{-0{,}06};$$

при нагревании жидкости

$$Nu = 2{,}25C\left(Pe\,\frac{d}{l}\right)^{1/3} Pr^{-0{,}03}\left(\frac{\mu_c}{\mu_{ж}}\right)^{-0{,}15}.$$

Формулы справедливы в области значений $Re < 2300$, $Gr < 10^4$, $Pe\,\frac{d}{l} > 100$, $40 < Pr < 1100$, $1{,}8 < \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} < 10^3$ — при охлаждении и $0{,}2 < \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} < 0{,}6$ — при нагревании жидкости.

Здесь $\alpha = \frac{\overline{q}}{\Delta t_н}$; $l_0 = d$; $t_{оп} = t_{ж} = \frac{1}{2}(t_{ж1} + t_{ж2})$, $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$ — температуры жидкости при входе и выходе из трубы; t_c — средняя температура стенки; w — средняя скорость жидкости в *м/сек*; μ_c и $\mu_{ж}$ — абсолютная вязкость при температурах t_c и $t_{ж}$; d — диаметр круглой трубы или эквивалентный диаметр канала, равный $\frac{4f}{U}$ в *м*; где f — площадь поперечного сечения, а U — периметр канала; l — длина трубы или канала в *м*; C — постоянная; для круглых труб $C = 1$; для прямоугольных каналов с отношением сторон $\frac{b}{h} = 1 \div 5$

$$C = 1 \div 0{,}79;$$

при $\frac{b}{h} > 5$

$$C \approx 0{,}79.$$

При вязкостно-гравитационном режиме течения жидкости расчет теплоотдачи производится следующим образом:

а) При течении по вертикальным трубам сверху вниз при охлаждении и снизу

вверх при нагревании в области значений $Re \leqslant 2300$, $Gr \cdot Pr = 8 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^8$; $Pr = 2 \div 130$; $\frac{l}{d} = 20 \div 600$ по формуле [28]

$$Nu = \frac{1}{\varphi} Pe \frac{d}{l}, \qquad (13)$$

где

$$\varphi = 8{,}64\ Pe^{0,6} \cdot (Gr \cdot Pr)^{-0,2} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,53} - 2.$$

Здесь $\alpha = \frac{\bar{q}}{\Delta \bar{t}_a}$; $l_0 = d$; $t_{on} = \frac{1}{2}(t_{ж} + t_c)$;

$$t_{ж} = \frac{1}{2}(t_{ж1} + t_{ж2});$$

в критерии Gr значение $\Delta t = t_{ж} - t_c$; d — диаметр в *м*; l — длина трубы в *м*.

б) При течении по вертикальным трубам снизу вверх при охлаждении и сверху вниз при нагревании приближенный расчет может быть произведен также по формуле (13); при этом α, вычисленное по формуле, должно быть увеличено на 15—25% (меньшая поправка берется для узких труб, $d = 5 \div 10$ *мм*, большая — для широких, $d = 10 \div 20$ *мм*).

в) При течении по горизонтальным трубам в области значений $Re < 2300$, $Gr = 6{,}7 \cdot 10^4 \div 3{,}6 \cdot 10^6$, $Pr = 2 \div 12$ по формуле [23]

$$Nu = 0{,}74 Pe^{0,2} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \varepsilon_l, \qquad (14)$$

где α, l_0, t_{on} и Δt вычисляются так же, как при расчете по формуле (13); ε_l — поправка, учитывающая отношение длины трубы к диаметру $\left(\frac{l}{d}\right)$; значения ε_l в формуле (14):

$\frac{l}{d}$	1	2	5	10	15	20	30	40	50 и выше
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

При турбулентном течении жидкости (газа) в прямых круглых трубах в области значений $Re = 10^4 \div 2 \cdot 10^6$, $Pr = 0{,}7 \div 200$ расчет теплоотдачи производится по формуле М. А. Михеева [24]:

$$Nu = 0{,}021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l, \qquad (15)$$

где $\alpha = \frac{\bar{q}}{\Delta \bar{t}_л}$; $l_0 = d$; $t_{on} = t_{ж} = \frac{1}{2}(t_{ж1} + t_{ж2})$; Pr_c — значение числа Прандтля при температуре стенки t_c; ε_l — поправка, учитывающая отношение длины трубы l к диаметру d; значения ε_l даны в табл. 22 [23].

Таблица 22

Значения ε_l

Re	Отношение $\frac{l}{d}$								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50 и выше
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1,0
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,0
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,0
10^5	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,0

Для двухатомных газов ($Pr = 0{,}71$) формула (14) принимает вид

$$Nu = 0{,}018 Re^{0,8} \varepsilon_l. \qquad (15а)$$

Формулы (15) и (15а) применимы также к расчету теплоотдачи при турбулентном движении жидкости в прямых каналах следующих профилей поперечного сечения: квадратных, прямоугольных с отношением сторон $\frac{b}{h} = 4 \div 40$; треугольных (равносторонний треугольник); трапецоидальных; кольцевых с отношением диаметра внешней трубы к диаметру внутренней $\frac{d_2}{d_1} = 1 \div 6$ при обогреве внутренней, внешней или обеих труб одновременно. Формулами (15) и (15а) можно пользоваться также для расчета теплоотдачи в пучках труб при продольном обтекании. В этом случае значения α, вычисленные по формулам, должны быть умножены на поправочный коэффициент

$$\varepsilon_s = \left(\frac{s_1 s_2}{d^2}\right)^{0,18},$$

где s_1 и s_2 — шаги труб в пучке, d — наружный диаметр трубы.

При расчете теплоотдачи в каналах некруглого сечения в формулы (15) и (15а) вместо диаметра подставляется эквивалентный диаметр $d_{эк} = \frac{4f}{U}$, где

f — площадь поперечного сечения канала; U — полный (смоченный) периметр сечения независимо от того, какая часть периметра участвует в теплообмене.

Теплоотдача в изогнутых трубах (змеевиках) приближенно рассчитывается по формулам (15) и (15а) с внесением поправки $\varepsilon_к = 1 + 1{,}77\frac{d}{R}$, на которую умножается α (d — внутренний диаметр трубы, R — радиус закругления).

При течении жидкости в трубах в области $Re = 2300 \div 10\,000$ надежные расчетные формулы отсутствуют. В этих случаях расчет теплоотдачи производится непосредственно по опытным данным, полученным в условиях, близких к расчетным.

При течении газа в прямых круглых трубах с высокой дозвуковой скоростью ($M \leqslant 1$) при больших температурных напорах $\left(2 < \frac{T_1}{T_c} < 4\right)$ в области значений $Pe = 7 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5$ и $\frac{l}{d} > 60$ расчет теплоотдачи производится по формуле А. А. Гухмана и Н. В. Илюхина [12]:

$$Nu = 0{,}0162Pe^{0{,}82}\left(\frac{T_m}{T_c}\right)^{0{,}35},$$

где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_c}$; $Pe = \frac{14\,400GC_{pc}}{\pi d\lambda_c}$;

$$M = \frac{w_2}{\sqrt{\varkappa gRT_2}}; \quad \alpha = \frac{\bar{q}}{\Delta\bar{t}_л};$$

$$\Delta\bar{t}_л = \frac{T_{m1} - T_{m2}}{\ln\frac{T_{m1} - T_c}{T_{m2} - T_c}};$$

T_{m1} и T_{m2} — температуры торможения газа на входе и выходе из трубы в °К;

$$T_{m1} = T_1 + \frac{Aw_1^2}{2gc_{p1}}; \quad T_{m2} = T_2 + \frac{Aw_2^2}{2gc_{p2}};$$

T_1 и T_2 — термодинамические температуры (т. е. действительные температуры) газа на входе и выходе из трубы в °К; w_1 и w_2 — средние скорости газа при входе и выходе из трубы в *м/сек*; c_{p1}, c_{p2} и c_{pc} — теплоемкости газа при T_1, T_2, и T_c в *ккал/кГ·град*; T_c — температура стенки в °К; $T_m = T_c + \Delta\bar{t}_л$ — средняя по длине температура торможения газа в °К; G — расход газа в *кГ/сек*; λ_c — коэффициент теплопроводности газа при T_c; $\varkappa$ — показатель адиабаты; R — газовая постоянная в *кГм/кг·град*; g — ускорение силы тяжести в *м/сек²*; d — диаметр трубы в *м*.

Теплоотдача при продольном обтекании пластины. Местная и средняя теплоотдача пластины, продольно обтекаемой жидкостью или газом при ламинарном пограничном слое ($Re_x < 5 \cdot 10^5$), определяется по формулам Г. Н. Кружилина [17]:

$$Nu_x = 0{,}335Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3},$$

$$Nu = 0{,}67Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3},$$

где $Nu_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda}$; $Re_x = \frac{w_0 x}{\nu}$; $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$; $Re = \frac{w_0 l}{\nu}$; $\alpha_x = \frac{q}{\Delta t_н}$ — местный коэффициент теплоотдачи на расстоянии x от передней кромки пластины; $\alpha = \frac{\bar{q}}{\Delta t_н}$ — средний коэффициент теплоотдачи на пластине или на участке пластины (считая от передней кромки) длиной l; $\Delta t_н = t_c - t_0$; t_c — температура поверхности пластины; t_0 — температура набегающего потока вдали от пластины; w_0 — скорость набегающего потока в *м/сек*; λ и ν — коэффициент теплопроводности и кинематический коэффициент вязкости газа или жидкости при температуре t_0.

Местная и средняя теплоотдача пластины, продольно обтекаемой двухатомным газом, при полностью турбулентном пограничном слое определяется по следующим формулам, полученным в МЭИ:

$$Nu_x = 0{,}0255Re_x^{0{,}8},$$

$$Nu = 0{,}032Re^{0{,}8};$$

формулы справедливы при значениях $10^5 < Re_x < 2 \cdot 10^6$, $10^5 < Re < 2 \cdot 10^6$, $M = \frac{w_0}{\sqrt{\varkappa gRT_0}} \leqslant 0{,}8$ и $1 < \frac{T_c}{T_0} \leqslant 1{,}4$. Величины Nu_x, Re_x, Nu, Re, α_x и α вычисляются так же, как в предыдущем случае, с той лишь разницей, что здесь

$$\Delta t_н = t_c - t_{co},$$

где

$$t_{co} = t_0 + r\frac{\varkappa - 1}{\varkappa R}\frac{w_0^2}{2g};$$

r — коэффициент восстановления; для пластины при турбулентном пограничном слое $r \approx 0{,}89$; $\varkappa$ — показатель адиабаты; R — газовая постоянная; $T_0 = t_0 + 273$; $T_c = t_c + 273$. При значениях $M \ll 1$, $t_{c0} = t_0$.

Теплоотдача при поперечном обтекании труб и пучков труб. Расчет теплоотдачи цилиндра, обтекаемого поперечным потоком воздуха, производится по следующей формуле, действительной в области $Re = 5 \div 10^5$:

$$Nu = C\,Re^n \cdot \varepsilon, \qquad (16)$$

где $\alpha = \dfrac{q}{t_c - t_{ж}}$; $l_0 = d$; $t_{оп} = t_{ж}$; значения C и n, зависящие от Re, даны в табл. 23; ε — поправочный коэффициент, учитывающий степень турбулентности набегающего потока.

Таблица 23

Значения C и n

Re	C	n
5—80	0,81	0,40
80—$5 \cdot 10^3$	0,625	0,46
$5 \cdot 10^3$—10^5	0,197	0,60

Значение ε в формуле (16):

свободная струя на выходе из сопла; поток в разомкнутой трубе с плавным входом	1,00
поток в замкнутой трубе:	
с успокоительной решеткой	1,08
после вентилятора и успокоительной решетки	1,18
после вентилятора (без успокоительной решетки)	1,50
поток в разомкнутой трубе с турбулизирующей решеткой, отстоящей на $0{,}5d$ от цилиндра диаметром d	1,60

При обтекании цилиндра под углом $\varphi < 90°$ коэффициент теплоотдачи, вычисленный по формуле (16), должен быть умножен на поправочный коэффициент ε_φ.

Значения ε_φ [23]:

$\varphi°$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_φ	1	1,03	1,03	0,92	0,80	0,70	0,60	0,56	0,54

Расчет теплоотдачи в пучках труб, обтекаемых поперечным потоком газа, может быть произведен по формулам, полученным в ЦКТИ [2] и действительным в области $Re = 2 \cdot 10^3 \div 60 \cdot 10^3$;

для шахматных пучков:

а) при охлаждении газа

$$Nu = 0{,}18 Re^{0{,}61} \eta_1 \eta_2 \eta_3;$$

б) при нагревании газа

$$Nu = \left(0{,}288 - 0{,}108\,\frac{T_г}{T_c}\right) \cdot Re^{0{,}61}\ \eta_1 \eta_2 \eta_3;$$

для коридорных пучков:

а) при охлаждении газа

$$Nu = 0{,}119 Re^{0{,}66}\,(1 - \eta_1 \eta_2)\,\eta_3;$$

б) при нагревании газа

$$Nu = \left(0{,}19 - 0{,}071\,\frac{T_г}{T_c}\right) \times$$

$$\times\, Re^{0{,}66}\,(1 - \eta_1 \eta_2)\,\eta_3.$$

Здесь

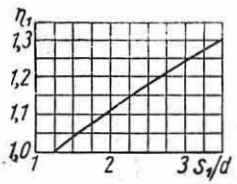
$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_c};\quad Re = \frac{w d}{\nu_c};\quad \alpha = \frac{\bar{q}}{\bar{\Delta} t_д};$$

d — наружный диаметр трубы; λ_c — коэффициент теплопроводности, а ν_c — кинематический коэффициент вязкости газа при температуре стенки t_c; w — скорость в узком сечении пучка, отнесенная к средней температуре газового потока

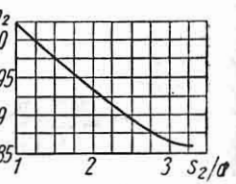
$$t_г = t_c \pm \bar{\Delta} t_д;\ T_г = t_г + 273;$$

$$T_c = t_c + 273;$$

η_1, η_2, η_3 — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние шага по ширине

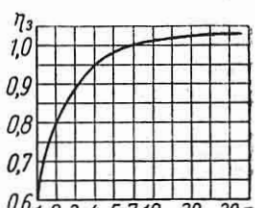


Фиг. 9. Коэффициент, учитывающий шаг по ширине для шахматных пучков.



Фиг. 10. Коэффициент, учитывающий шаг по глубине для шахматных пучков.

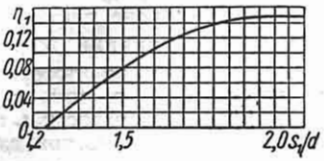
пучка s_1, шага по глубине s_2 и числа рядов труб в пучке n. Для шахматных пучков η_1, η_2 и η_3 выбираются по фиг. 9, 10 и 11, для коридорных пучков — по фиг. 12, 13 и 14.



Фиг. 11. Коэффициент, учитывающий число рядов труб для шахматных пучков.

При обтекании пучков под углом $\varphi < 90°$, α вычисляется по тем же формулам, что и при поперечном обтекании пучков, с той

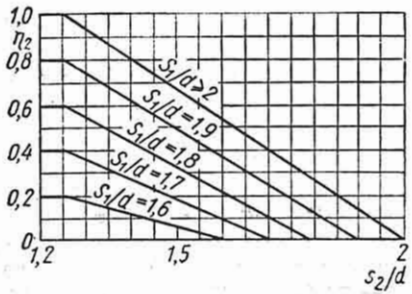
разницей, что скорость газа условно относится к живому сечению газохода



Фиг. 12. Коэффициент, учитывающий шаг по ширине для коридорных пучков.

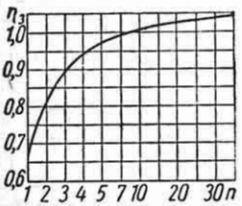
в плоскости пучка, а не к сечению, нормальному к оси газохода.

Найденная таким образом величина α должна быть умножена на поправочный

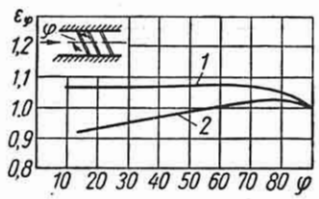


Фиг. 13. Коэффициент, учитывающий шаг по глубине для коридорных пучков.

коэффициент ε_φ, зависящий от φ и выбираемый для коридорного расположения труб по кривой *1*, а для шахматного расположения по кривой *2* фиг. 15.



Фиг. 14. Коэффициент, учитывающий число рядов труб для коридорных пучков.



Фиг. 15. Поправочный коэффициент, учитывающий обтекание пучка под углом.

Теплоотдача при поперечном обтекании пучков из ребристых труб. Расчет теплоотдачи в пучках труб с круглыми и квадратными ребрами, обтекаемых поперечным потоком газа, может быть произведен по следующей формуле [15], действительной в области значений $\mathrm{Re} = 3 \cdot 10^3 \div 25 \cdot 10^3$ и $\frac{d}{b} = 3 \div 4{,}8$:

$$\mathrm{Nu} = C\,\mathrm{Re}^m \left(\frac{d}{b}\right)^{-0{,}54} \left(\frac{h}{b}\right)^{-0{,}14}, \quad (17)$$

где

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha b}{\lambda}; \quad \mathrm{Re} = \frac{wb}{\nu}; \quad \alpha = \frac{\bar{q}}{\Delta t_л};$$

b — шаг ребер в *м*; d — наружный диаметр трубы в *м*; h — высота ребра в *м* (см. фиг. 2 и 3); λ — коэффициент теплопроводности и ν — кинематический коэффициент вязкости газа при средней температуре газа $t_г = t_c \pm \Delta\bar{t}_л$; w — скорость газа (в *м/сек*) в узком сечении f пучка, вычисленная при температуре газа $t_г$.

$$f = \left[1 - \frac{d}{s_1}\left(1 + 2\frac{h}{b}\frac{\delta}{d}\right)\right] f_г,$$

где $f_г$ — сечение свободного газохода (т. е. без пучка) в $м^2$; s_1 — поперечный шаг труб в пучке в *м*; δ — средняя толщина ребра в *м*. C и m — постоянные.

Для коридорных пучков труб с круглыми ребрами $C = 0{,}104$, с квадратными ребрами $C = 0{,}096$; в обоих случаях $m = 0{,}72$.

Для шахматных пучков труб с круглыми ребрами $C = 0{,}223$, с квадратными ребрами $C = 0{,}205$; в обоих случаях $m = 0{,}65$.

Значение α_2 в формуле (4) на стр. 128 выбирается на 15% меньше значения α, вычисленного по формуле (17), с целью учета неравномерности теплоотдачи по поверхности ребра.

Теплоотдача при свободном движении жидкости

Расчет теплоотдачи вертикальных и горизонтальных труб и проволок, вертикальных плит и шаров при естественной конвекции жидкости и газа в большом объеме может быть произведен по формуле М. А. Михеева [22]

$$\mathrm{Nu} = C\,(\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr})^n, \quad (18)$$

справедливой в области значений $4 \cdot 10^{-4} < \mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr} < 10^{13}$.

Величины C и n, зависящие от произведения $\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr}$, даны в табл. 24.

Здесь $\mathrm{Nu} = \frac{\alpha l_0}{\lambda}$; $\mathrm{Gr} = \frac{g\beta\Delta t l_0^3}{\nu^2}$; $\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}$;

Таблица 24

Значения C и n в зависимости от Gr·Pr

Gr·Pr	C	n
$10^{-4} \div 10^{-3}$	0,50	0
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^{2}$	1,18	$^1/_8$
$5 \cdot 10^{2} \div 2 \cdot 10^{7}$	0,54	$^1/_4$
$2 \cdot 10^{7} \div 10^{13}$	0,135	$^1/_3$

$\alpha = \frac{\bar{q}}{\Delta t}$; $\Delta t = t_c - t_{ж}$; t_c — температура внешней поверхности тела (стенки); $t_{ж}$ — температура жидкости вдали от тела; λ, ν, a, β — значения физических параметров при температуре $t_{оп} = \frac{1}{2}(t_c + t_{ж})$; l_0 — характерный размер; для труб, проволок и шаров $l_0 = d$, т. е. диаметр; для вертикальных плит $l_0 = h$, т. е. высота плиты.

Для конкретных жидкостей или газов формула (18) может быть представлена в виде

$$\alpha = A \Delta t^n l_0^{3n-1},$$

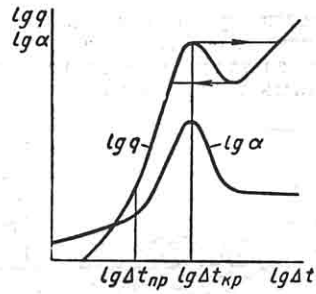
где Δt — в °С и l_0 в *м*; для данной жидкости или газа в заданном интервале значений Gr·Pr множитель A является функцией температуры (см. табл. 25 и 26).

Расчет теплоотдачи горизонтальных плит рекомендуется [23] производить также по формуле (18), увеличивая на 30% значение α, вычисленное по формуле, для плит, обращенных теплоотдающей поверхностью вверх, и уменьшая на 30% для плит, обращенных теплоотдающей поверхностью вниз; в этом случае размер l_0 принимается равным меньшей стороне плиты.

Теплоотдача при кипении жидкости

Кипение жидкости на поверхности нагрева наблюдается в том случае, когда температура поверхности t_c выше температуры насыщения $t_н$ при данном внешнем давлении.

Различают *пузырчатый* и *пленочный* режимы кипения. Если тепловая нагрузка поверхности нагрева q или $\Delta t = t_c - t_н$ меньше некоторых критических значений $q_{кр}$ и $\Delta t_{кр}$, то кипение будет пузырчатым. При пузырчатом кипении α растет с увеличением Δt (или q), достигая максимального значения при $\Delta t = \Delta t_{кр}$ (или $q = q_{кр}$) (см. фиг. 16). При дальнейшем



Фиг. 16. Зависимость α и q от Δt при кипении в большом объеме.

Таблица 25

Значения A для воздуха [23]

Gr·Pr	Температура $t_{оп}$ в °С						
	0	50	100	200	300	500	1000
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^{2}$	0,25	0,26	0,27	0,29	0,30	0,32	0,35
$5 \cdot 10^{2} \div 2 \cdot 10^{7}$	1,22	1,14	1,09	1,05	0,95	0,85	0,70
$2 \cdot 10^{7} \div 10^{13}$	1,45	1,27	1,14	0,97	0,85	0,70	0,48

Таблица 26

Значения A для воды [23]

Gr·Pr	Температура $t_{оп}$ в °С							
	0	20	40	60	80	100	150	200
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^{2}$	8,0	11,3	13,5	15,1	16,3	17,2	18,7	19,4
$5 \cdot 10^{2} \div 2 \cdot 10^{7}$	60	96	128	153	176	195	235	262
$2 \cdot 10^{7} \div 10^{13}$	88	170	250	312	366	414	522	614

увеличении Δt или q пузырчатый режим кипения переходит в пленочный; при этом α резко падает (приблизительно в 20—30 раз). В области развитого пленочного кипения α почти не зависит от Δt, а q возрастает приблизительно пропорционально Δt.

Если температура стенки устанавливается независимо от процесса кипения (например, при паровом обогреве), то при переходе через критическую точку вместе с α падает также и q. Если независимо от процесса устанавливается q (например, при электрическом обогреве), то при переходе через критическую точку резко возрастает температура стенки. В первом случае приходится считаться с уменьшением производительности аппарата, во втором — с возможным пережогом стенки.

Величины $q_{кр}$ и $\Delta t_{кр}$ зависят главным образом от физических свойств жидкости. Так, при кипении воды в условиях естественной конвекции и $p = 1$ *ата* $q_{кр} \approx \approx (1 \div 1{,}5) \cdot 10^6$ *ккал/м²·час* и $\Delta t_{кр} \approx 25°$ С; для спирта в тех же условиях $q_{кр} \approx \approx (0{,}4 \div 0.5) \cdot 10^6$ *ккал/м²·час* и $\Delta t_{кр} \approx \approx 20°$ С; для бензола $q_{кр} \approx 0{,}35 \times \times 10^6$ *ккал/м²·час* и $\Delta t_{кр} \approx 47°$ С. По некоторым данным $q_{кр}$ зависит также от шероховатости поверхности нагрева и ее ориентации в поле силы тяжести.

При кипении чистых жидкостей, смачивающих стенку, в условиях естественной конвекции величину $q_{кр}$ можно определить по формуле Г. Н. Кружилина [19]

$$q_{кр} = 12000 \frac{\lambda^{1/2} (\gamma - \gamma_п)^{0{,}542} (\gamma_п r T_н)^{1/3} \sigma^{0{,}042}}{\gamma^{0{,}417} c^{0{,}17}} \text{ ккал/м²·час}, \quad (19)$$

или по приближенной формуле С. С. Кутателадзе

$$q_к = 3600 \cdot k \cdot r \sqrt{g \gamma_п} \sqrt[4]{\sigma (\gamma - \gamma_п)} \text{ ккал/м²·час}, \quad (20)$$

где r — теплота парообразования в *ккал/кГ*; σ — коэффициент поверхностного натяжения в *кГ/м* (значения σ для воды см. табл. 18); γ и $\gamma_п$ — удельные веса жидкой и паровой фазы в *кГ/м³*; λ — коэффициент теплопроводности в *ккал/м·час·град* и c — теплоемкость жидкости в *ккал/кГ·град*; $T_н = t_н + 273$; g — ускорение силы тяжести в *м/сек²*; k — постоянная. По опытным данным для различных жидкостей, полученным в различных условиях, $k = 0{,}13 \div 0{,}19$. В среднем можно принять $k = 0{,}16$ [20].

Формулы (19) и (20) действительны при кипении жидкости, нагретой до температуры насыщения.

При кипении жидкости, нагретой до температуры меньшей, чем $t_н$, критическая тепловая нагрузка

$$q'_{кр} = \\ = q_{кр} \left[1 + 0{,}065 \left(\frac{\gamma}{\gamma_п} \right)^{0{,}8} \cdot \frac{c\vartheta}{r} \right] \text{ккал/м²·час},$$

где $\vartheta = t_н - t_ж$; $t_ж$ — температура жидкости вдали от поверхности нагрева.

Для данной жидкости величина $q_{кр}$ зависит от давления. При значениях $p < \frac{1}{3} p_{кр}$ величина $q_{кр}$ растет с увеличением p, а при значениях $p > \frac{1}{3} p_{кр}$ — падает.

При пузырчатом кипении жидкости в условиях естественной конвекции различают область малых тепловых нагрузок ($q < q_{пр}$) и область развитого пузырчатого кипения ($q_{пр} < q < q_{кр}$). В области значений $q < q_{пр}$ интенсивность теплообмена в основном определяется естественной конвекцией однофазной жидкости, и величина α при кипении в большом объеме может быть рассчитана по формуле (18). Для воды при $p = 1$ *ата* $q_{пр} \approx 5000$ *ккал/м²·час* и $\Delta t_{пр} \approx 5°$ С. Для других жидкостей при соответствующих давлениях $q_{пр}$ можно определить как абсциссу точки пересечения кривых $\alpha = f(q)$, построенных по формуле (18) и формулам (21), (22) или (23).

В области развитого пузырчатого кипения жидкости, смачивающей стенку, расчет теплоотдачи может быть произведен по одной из приведенных ниже формул.

При кипении в большом объеме (в том числе на внешней поверхности пучков труб) в условиях естественной конвекции α определяется по формуле [20]

$$\alpha = C p^{0{,}4} q^{0{,}7} \text{ ккал/м²·час·град}, \quad (21)$$

справедливой в области тепловых нагрузок от $q_{пр}$ до $q = (0{,}2 \div 0{,}4) q_{кр}$ и давлений от 0,2 до 10 *ата*.

Здесь $\alpha = \frac{q}{\Delta t}$; q — в *ккал/м²·час*; $\Delta t = t_c - t_н$ в °С; p — абсолютное давление в *кГ/см²*; C — коэффициент, зависящий от свойств жидкости и поверхности нагрева. Для воды, кипящей на поверхности нормальных технических труб из цветного металла, можно принять $C = 2{,}6$. Для других жидкостей $C = 2{,}6\varphi$. Значения коэффициента φ для ряда исследованных жидкостей:

воды	1,0
9%-ного водного раствора NaCl	0,86
24%-ного водного раствора NaCl	0,62
26%-ного водного раствора глицерина	0,83
25%-ного водного раствора сахара	0,57
10%-ного водного раствора Na_2SO_4	0,91
керосина	0,31—0,56
газолина	0,27
бензола	0,31
этилового спирта	0,45
метилового спирта	0,36
гептана	0,46

Формулу (21) и значения φ для растворов следует рассматривать как первое приближение, так как растворам, вообще говоря, свойственны иные закономерности.

При кипении жидкости в трубах вертикальных испарителей с естественной циркуляцией, а также при кипении в большом объеме в условиях естественной конвекции α определяется по формуле В. И. Толубинского

$$\alpha = 1{,}82\lambda \left(\frac{\gamma}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\nu}{a}\right)^{-0{,}3} \times \times \left[\left(\frac{\gamma_n}{\gamma_{n1}}\right)^{1{,}1} \frac{q}{r\gamma_n}\right]^{0{,}6} \text{ккал/м}^2\cdot\text{час}\cdot\text{град}, \quad (22)$$

где λ — в *ккал/м·час·град*; γ, γ_n и γ_{n1} — в *кГ/м³*; σ — в *кГ/м*; ν и a — в *м²/час*; r — в *ккал/кГ*; q — в *ккал/м²·час*; γ_{n1} — удельный вес пара при $p = 1$ *ата*. Остальные обозначения те же, что и в предыдущем случае.

Формула (22) обоснована экспериментально при кипении воды, сахарных растворов и некоторых органических жидкостей с числами $Pr < 100$ на стальных (без оксидной пленки), латунных, медных и хромированных поверхностях. При кипении в трубах она проверена на опыте в области тепловых нагрузок от $q_{пр}$ до $q = 80 \cdot 10^3$ *ккал/м²·час*, давлений от 0,2 до 1 *ата* и скоростей циркуляции $w_0 < 1$ *м/сек*. При кипении в большом объеме формула (22) приблизительно справедлива при значениях $q_{пр} < q < q_{кр}$ и p до 70 *ата*.

Формулы (21) и (22) дают значения α при кипении на технически гладких неокисленных поверхностях. При кипении на окисленных поверхностях необходимо учитывать термическое сопротивление слоя окиси и увеличение α за счет шероховатости. Это приводит к следующей приближенной формуле для „видимого" коэффициента теплоотдачи (точнее — коэффициента теплопередачи от металлической поверхности через слой окиси к кипящей жидкости) от окисленной поверхности

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{C\varphi p^{0{,}4} q^{0{,}7}} + R}. \quad (23)$$

Для обычных окисленных стальных труб можно принять $C \approx 6{,}5$ и

$$R \approx 0{,}9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2\text{час}\cdot\text{град/ккал} \text{ [20]}.$$

Теплоотдача при конденсации пара

На поверхности теплообмена, температура которой ниже температуры насыщения, возникает конденсация пара. Если образующийся конденсат смачивает поверхность, то конденсация является *пленочной*; если конденсат не смачивает поверхности, конденсация оказывается *капельной*. На технических поверхностях при конденсации чистого водяного пара обычно наблюдается пленочная конденсация. Устойчивая капельная конденсация может быть получена путем покрытия поверхности или введения в пар некоторых веществ (олеаты, стеараты или пальмитаты меди, цинка и железа), которые делают поверхность гидрофобной (т. е. несмачиваемой) по отношению к конденсату.

При пленочной конденсации чистого насыщенного неподвижного пара, не содержащего неконденсирующихся газов, α вычисляется следующим образом:

1) При конденсации пара на вертикальных трубах и стенках:

а) если $\Delta t < \Delta t_{кр}$ (ламинарное течение пленки) — по формуле

$$\alpha = 1{,}13\left(\frac{\lambda^3\gamma^2 r}{\mu\Delta t H}\right)^{1/4} = 1{,}13A\left(\frac{r}{\Delta t H}\right)^{1/4}; \quad (24)$$

б) если $\Delta t > \Delta t_{кр}$ (течение пленки ламинарное вверху и турбулентное внизу) — по формуле [20]

$$\frac{\alpha}{\lambda}\left(\frac{\nu a}{g}\right)^{1/3} = \psi_T + \left[100 - 396\psi_T\left(\frac{\nu}{a}\right)^{1/3}\right]\frac{\nu}{a}\,\frac{r}{c\Delta t}\left(\frac{\nu a}{gH^3}\right)^{1/3},$$

или

$$\alpha = B\psi_T + \left[100 - 396\psi_T\left(\frac{\nu}{a}\right)^{1/3}\right] \times \frac{\lambda r}{c\Delta t H}\,\frac{\nu}{a}. \qquad (25)$$

Критическая разность температур между паром и стенкой (при $Re_{кр} = 100$)

$$\Delta t_{кр} = 392\,\frac{r}{c}\,\frac{\nu}{a}\left(\frac{\nu^2}{gH^3}\right)^{1/3} = 392C\,\frac{r}{H}.$$

2) При конденсации пара на одиночных горизонтальных трубах

$$\alpha = 0{,}725\left(\frac{\lambda^3\gamma^2 r}{\mu\Delta t d}\right)^{1/4} = 0{,}725A\left(\frac{r}{\Delta t d}\right)^{1/4}. \qquad (26)$$

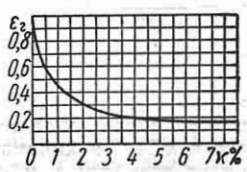
В уравнениях обозначено:

$$\alpha = \frac{\bar{q}}{\Delta t}\ ккал/м^2 \cdot час \cdot град;$$

$\bar{q}$ — средняя плотность теплового потока или тепловая нагрузка в $ккал/м^2 \cdot час$; $\Delta t = t_н - t_c$; $t_н$ — температура насыщения пара в °С; t_c — средняя температура стенки в °С; H — высота стенки или высота вертикальной трубы в $м$; d — диаметр трубы в $м$; λ — коэффициент теплопроводности в $ккал/м \cdot час \cdot град$; a — коэффициент температуропроводности в $м^2/час$; γ — удельный вес в $кГ/м^3$; c — теплоемкость в $ккал/кГ \cdot град$; μ — динамический коэффициент вязкости в $кГ \cdot час/м^2$; ν — кинематический коэффициент вязкости в $м^2/час$ конденсата при температуре $t_{оп} = \frac{1}{2}(t_н + t_c)$; r — теплота парообразования при температуре насыщения $t_н$ в $ккал/кГ$.

$\psi_T = \frac{\alpha_T}{\lambda}\left(\frac{\nu a}{g}\right)^{1/3}$ — некоторый параметр, содержащий коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении пленки конденсата (α_T). При значениях $1 < \frac{\nu}{a} < 5$ величина $\psi_T \approx 0{,}16$. Подробные данные см. [20]; A, B и C — коэффициенты, зависящие для данного вещества только от температуры. Для воды они приведены в табл. 27.

Если пар содержит воздух, то значения коэффициентов теплоотдачи, вычисленные по формулам для чистого пара, умножаются на поправочный коэффициент $\varepsilon_г$, зависящий от весовой концентрации воздуха в паре $х$, скорости пара и других факторов. График зависимости $\varepsilon_г = f(х)$ для неподвижного водяного пара приведен на фиг. 17. Более подробные сведения по этому вопросу см. [4].



Фиг. 17. Поправочный коэффициент, учитывающий содержание воздуха в паре.

Таблица 27

Значения коэффициентов A, B и C при конденсации водяного пара [20]

Коэффициенты	Температура $t_{оп}$ в °С										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$A = \left(\frac{\lambda^3\gamma^2}{\mu}\right)^{1/4}$	1 270	1 470	1 700	1 900	2 070	2 190	2 300	2 370	2 410	2 430	2 430
$B = \left(\frac{\gamma^2 c\,\lambda^2}{\mu}\right)^{1/3}$	16 500	20 900	25 000	28 400	31 600	33 900	36 700	38 400	39 700	40 300	41 000
$C \cdot 10^4 = \frac{\nu}{ca}\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3} \cdot 10^4$.	9,42	3,30	1,51	0,855	0,530	0,361	0,259	0,203	0,169	0,146	0,129

Если пар движется со скоростью w_n, то при значениях $w_n^2\gamma_n < 1 \div 1{,}5$ *кГ/сек²·м* коэффициенты теплоотдачи можно приближенно определять по формулам для неподвижного пара; при значениях $w_n^2\gamma_n > 1 \div 1{,}5$ *кГ/сек²·м* величина α должна определяться с учетом скорости движения пара; см. [20].

При конденсации пара на пучках горизонтальных труб учитывается изменение скорости движения пара и утолщение пленки конденсата на нижележащих рядах труб. Для одиночной горизонтальной трубы и первого ряда пучка горизонтальных труб, обтекаемых сверху вниз чистым водяным паром (без примеси газов), α вычисляется по формуле [38]

$$\frac{\alpha}{\alpha_н} = 173\pi_\partial^{0{,}167}\mathrm{Re}_n^{-0{,}175}\mathrm{Nu}_н^{-0{,}7}, \quad (27)$$

справедливой в области значений $p = 0{,}08 \div 1$ *ата*; $\Delta t = 3 \div 25°$ С и $\pi_\partial < 800$.

Здесь обозначено:

$$\pi_\partial = \frac{w_n^2\gamma_n\alpha_н}{g\gamma\lambda}; \quad \mathrm{Re}_n = \frac{w_n d}{\nu_n}; \quad \mathrm{Nu}_н = \frac{\alpha_н d}{\lambda};$$

$\alpha_н$ — коэффициент теплоотдачи в неподвижном паре, вычисляемый по формуле (26); w_n — скорость набегающего потока пара в *м/сек*; γ_n и ν_n — удельный вес в *кГ/м³* и кинематический коэффициент вязкости в *м²/сек* пара при температуре насыщения.

Коэффициент теплоотдачи для i-го ряда горизонтального пучка при давлении пара $p \leqslant 1$ *ата* можно определить по следующей приближенной формуле [5]:

$$\alpha_i = \alpha_1\sigma_i\left(\frac{G_i}{G_1}\right)^{1/6},$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи для первого ряда пучка; G_1 и G_i — весовые расходы пара перед первым и i-м рядами; σ_i — коэффициент, учитывающий влияние стекающего сверху конденсата (для первого ряда $\sigma_i = 1$, для остальных рядов $\sigma_i < 1$); $G_i = G_{i-1} - \Delta G_{i-1}$, где ΔG_{i-1} — количество пара, конденсирующегося в $(i-1)$-м ряду труб;

$$\Delta G_{i-1} = \frac{\alpha_{i-1}\Delta t F_{i-1}}{r},$$

где F_{i-1} — поверхность $(i-1)$-го ряда. До получения более надежных данных величину σ_i для всех рядов пучка в первом приближении можно принимать равной единице. Значения α_i вычисляют последовательно, начиная с первого ряда: α_1 определяют по формуле (27), затем находят $\Delta G_1 = \frac{\alpha_1\Delta t F_1}{r}$, $G_2 = G_1 - \Delta G_1$ и α_2 далее ΔG_2, G_3 и α_3 и т. д.

Средний коэффициент теплоотдачи для пучка, состоящего из n горизонтальных рядов труб,

$$\alpha = \frac{1}{F}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i F_i,$$

где $F = \sum_{i=1}^{n} F_i$. Если поверхность всех рядов труб одинакова, то

$$\alpha = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i.$$

Все приведенные выше формулы относятся к конденсации насыщенного пара. При конденсации перегретого пара и небольших температурах перегрева α вычисляется по тем же формулам, но вместо r в них подставляют величину $[r + c_p(t_n - t_н)]$, где c_p — теплоемкость, а t_n — температура перегретого пара.

Формулы (24) — (27) дают значения коэффициентов теплоотдачи на чистых гладких поверхностях (чистые латунные и медные трубы, зачищенные до металлического блеска стальные трубы). Для окисленных, но не очень загрязненных труб (например, для нормальных стальных труб) значения коэффициентов теплоотдачи на 15—20% ниже.

ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

Основные понятия и законы

Энергия теплового излучения возникает в теле за счет тепловой энергии и представляет собой электромагнитные колебания, имеющие длину волны приблизительно от 0,7 до 50 *мк*. Излучение, испускаемое телом, падает на окружающие тела, частично поглощается ими (поглощенная энергия при этом превращается в тепло), частично отражается и снова падает на первое тело. Если из общего количества энергии Q, падающего на тело, поглощается Q_A и отражается Q_R, то $Q = Q_A + Q_R$. Отношение $\frac{Q_A}{Q} = A$ называется *коэффициентом*

поглощения, а отношение $\frac{Q_R}{Q} = R$ — *коэффициентом отражения*; очевидно,

$$A + R = 1.$$

Излучение называется *монохроматическим*, если оно отвечает какой-либо определенной частоте колебаний или длине волны (точнее — узкому интервалу длин волн). Излучение, отвечающее длинам волн от 0 до ∞, называется *интегральным*.

Количество энергии интегрального излучения, исходящего с поверхности излучающего тела в единицу времени, называется *лучистым потоком*.

Лучистый поток, исходящий с единицы поверхности излучающего тела по всем направлениям полупространства (полусферы), называется *плотностью полусферического излучения*

$$E = \frac{dQ}{dF} \text{ ккал/м}^2\cdot\text{час}.$$

Отсюда следует, что лучистый поток, исходящий со всей поверхности излучающего тела,

$$Q = \int_F E dF \text{ ккал/час}.$$

Тело, полностью поглощающее все падающее на него излучение, называется *абсолютно черным*. Для черного тела $A = 1$.

Пусть dE_λ — та часть плотности излучения абсолютно черного тела, которая слагается из энергии колебаний в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$; тогда по закону Планка

$$dE_\lambda = \frac{2\pi\cdot h\cdot c^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda,$$

где h — постоянная Планка; $h = 6{,}624 \times \times 10^{-27}$ *эрг·сек*; $c = 2{,}99776\cdot 10^{10}$ *см/сек* — скорость света; λ — длина волны в *см*; $k = 1{,}38047\cdot 10^{-16}$ *эрг/град* — постоянная Больцмана; $T°$ K — абсолютная температура черного тела.

Величина $\frac{dE_\lambda}{d\lambda}$, называемая спектральной интенсивностью, имеет максимум, отвечающий длине волны

$$\lambda_{max} = \frac{0{,}2897}{T} \text{ см},$$

т. е. максимум интенсивности излучения абсолютно черного тела с увеличением температуры перемещается в сторону более коротких волн (закон Вина).

Плотность излучения черного тела (интегральная)

$$E_0 = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} dE_\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3c^2} T^4,$$

или

$$E_0 = 5{,}672\cdot T^4 \text{ эрг/см}^2\cdot\text{сек}.$$

Таким образом, плотность излучения черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры (закон Стефана — Больцмана). В технической системе единиц плотность излучения черного тела

$$E_0 = C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ ккал/м}^2\cdot\text{час}, \quad (28)$$

где C_0=4,90 *ккал/м²·час*; K⁴ — коэффициент излучения черного тела; T — температура тела в °K.

Тело, поглощающее одну и ту же долю падающего на него излучения при всех длинах волн, называется *серым*. Для серых тел $A < 1$ и не зависит от температуры.

Излучение, испускаемое телом, называется *собственным*, если оно зависит только от температуры и природы данного тела. Собственное излучение возможно лишь для единичного тела, не находящегося в состоянии лучистого обмена с другими телами.

По закону Кирхгофа плотность собственного излучения серого тела

$$E = AE_0, \quad (29)$$

т. е. серое тело излучает тем больше энергии, чем больше его коэффициент поглощения A. Так как $A < 1$, то всегда $E < E_0$. Из формулы (29) видно, что для серых тел коэффициент A численно равен отношению $\frac{E}{E_0} = \varepsilon$, называемому *степенью черноты* тела. Из формул (28) и (29) следует, что

$$E = AC_0\left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4. \quad (30)$$

Большинство технических материалов можно приближенно рассматривать как серые тела. A и ε для них в общем случае зависят от природы тела, характера поверхности и температуры. Значения ε для различных тел приведены в табл. 28.

Таблица 28

Степень черноты полного излучения различных материалов [45]

Материал и характер поверхности	$t°$ C	
Чистые и окисленные металлы		
Алюминий:		
полированный	225—575	0,039—0,057
шероховатый	26	0,055
окисленный при 600° С	200—600	0,11—0,19
Покрытая алюминием поверхность меди при нагреве до 600° С	200—600	0,18—0,19
Покрытая алюминием поверхность стали при нагреве до 600° С	200—600	0,52—0,57
Вольфрам	230—2230	0,053—0,31
Вольфрамовая нить	3300	0,39
Вольфрамовая нить, бывшая в употреблении	25—3300	0,032—0,35
Железо:		
электролитное, тщательно полированное	175—225	0,052—0,064
сварочное, тщательно полированное	40—250	0,28
полированное	425—1020	0,144—0,377
свежеобработанное наждаком	20	0,242
окисленное, гладкое	125—525	0,78—0,82
литое, необработанное	925—1115	0,87—0,95
Стальное литье полированное	770—1040	0,52—0,56
Сталь:		
листовая шлифованная	940—1100	0,52—0,61
окисленная при 600° С	200—600	0,79
листовая с плотным блестящим слоем окиси	25	0,82
окисленная, шероховатая	40—370	0,94—0,97
мягкая расплавленная	1600—1800	0,28
Чугун:		
полированный	200	0,21
обточенный	830—990	0,60—0,70
окисленный при 600° С	200—600	0,64—0,78
шероховатый, сильно окисленный	40—250	0,95
расплавленный	1300—1400	0,29
Золото тщательно полированное	225—625	0,018—0,035
Латунь:		
тщательно полированная состава (по весу) Cu 73,2%; Zn 26,7%	245—355	0,028—0,031
Cu 62,4%; Zn 36,8%; Pb 0,4%; Al 0,3%	255—375	0,039—0,037
Cu 82,9%; Zn 17,0%	275	0,030
прокатанная с естественной поверхностью	22	0,06
прокатанная, тертая грубым наждаком	22	0,20
тусклая	50—350	0,22
окисленная при нагреве до 600° С	200—600	0,61—0,59
Медь:		
тщательно полированная электролитная	80	0,018
полированная	115	0,023
шабреная до блеска, но не зеркальная	22	0,072
окисленная при нагреве до 600° С	200—600	0,57—0,55
продолжительно нагревавшаяся, покрытая толстым слоем окиси	25	0,78
расплавленная	1075—1275	0,16—0,13
Молибденовая нить	725—2600	0,096—0,292
Никель:		
нанесенный гальваническим способом на полированное железо и затем полированный	23	0,045
технически чистый, полированный	225—375	0,07—0,087
окисленный при нагреве до 600° С	200—600	0,37—0,48
никелированное травленое железо, неполированное	20	0,11
никелевая проволока	185—1000	0,096—0,186
Хромоникель	52—1035	0,64—0,76
Олово, блестящее луженое листовое железо	25	0,043—0,064
Платина, чистая полированная пластина	225—625	0,054—0,104
Платиновая:		
лента	925—1115	0,12—0,17
нить	25—1230	0,036—0,192
проволока	225—1375	0,073—0,182
Ртуть очень чистая	0—100	0,09—0,12
Свинец:		
чистый, неокисленный	125—225	0,057—0,075
серый, окисленный	24	0,281
окисленный при 200° С	200	0,63
Серебро:		
полированное чистое	225—625	0,0193—0,0324
полированное	38—370	0,0221—0,0312
Хром	38—538	0,08—0,26

Продолжение табл. 28

Материал и характер поверхности	$t°$ С	ε
Цинк:		
торговый (99,1%), полированный	225—325	0,045—0,053
окисленный при нагреве до 400° С	400	0,11
оцинкованное листовое железо очень блестящее	28	0,228
» » » серое, окисленное	24	0,276
Огнеупорные, строительные, теплоизоляционные и другие материалы		
Асбестовый картон	24	0,96
Асбестовая бумага	40—370	0,93—0,95
Асбошифер	20	0,96
Огнеупорные материалы:		
слабо излучающие	500—600	0,65—0,70
	1000	0,75
сильно излучающие	500—600	0,80—0,85
	1000	0,85—0,90
Динасовый кирпич, шероховатый:		
неглазурованный	1000	0,8
глазурованный	1100	0,85
Шамотный кирпич, глазурованный	1100	0,75
Шамот (SiO_2 55%; Al_2O_3 41%)	1230	0,59
Магнезитовый кирпич (MgO 80%; Al_2O_3 9%)	1500	0,39
Силикатный кирпич (SiO_2 95%)	1230	0,66
Силиманитовый кирпич (SiO_2 33%; Al_2O_3 64%)	1500	0,29
Красный кирпич, шероховатый	20	0,93
Фарфор глазурованный	22	0,92
Гипс	20	0,8—0,9
Штукатурка шероховатая, известковая	10—90	0,91
Мрамор сероватый, полированный	22	0,93
Кварц плавленый, шероховатый	20	0,93
Стекло гладкое	22	0,94
Бумага	20	0,8—0,9
Вода	0—100	0,95—0,96
Дерево строганое	20	0,8—0,9
Ламповая сажа, слой 0,075 *мм* и толще	40—370	0,95
Обмазка из жидкого стекла с ламповой сажей	100—225	0,96—0,95
Резина твердая, лощеная	23	0,95
Резина мягкая, серая, шероховатая	24	0,86
Толь кровельный	20	0,93
Уголь очищенный (0,9% золы)	125—625	0,81—0,79
Угольная нить	1040—1405	0,53
Эмаль белая, приплавленная к железу	19	0,9
Лак:		
белый эмалевый на железной шероховатой пластине	23	0,91
черный, блестящий, распыленный по железу	25	0,88
черный матовый	40—95	0,96—0,98
белый	40—95	0,80—0,95
Шеллак:		
черный, блестящий, на луженом железе	21	0,82
черный матовый	75—145	0,91
Масляные краски различных цветов	100	0,92—0,96
Алюминиевые краски разной давности с переменным содержанием Al	100	0,27—0,67
Алюминиевая краска после нагрева до 325° С	150—315	0,35
Алюминиевый лак на шероховатой пластине	20	0,39

Степени черноты, приведенные в табл. 28, получены путем измерения яркости излучения в направлении нормали к поверхности тела. Две температуры и две степени черноты, указанные для некоторых материалов, обозначают, что первая степень черноты относится к первой температуре, а вторая — ко второй, причем допускается линейная интерполяция.

Рассмотрим лучистый поток в направлении, образующем угол ψ с нормалью к излучающей поверхности. Лучистый поток в направлении ψ, отнесенный к единице телесного угла и единице поверхности в данном месте, ортогональной к направлению излучения, называется *интенсивностью* (яркостью) излучения

$$B = \frac{d^2Q}{d\omega dF_n} = \frac{d^2Q}{d\omega dF\cos\psi} \text{ ккал/стерадиан} \cdot м^2 \cdot \text{час}, \quad (31)$$

где $dF_n = dF\cos\psi$ — проекция элементарной площадки dF на поверхности излучающего тела на плоскость, ортогональную к направлению излучения; $d\omega = \frac{df}{r^2}$ — элементарный телесный угол с вершиной на площадке dF, вырезающий на поверхности сферы радиуса r (проведенной из вершины, как из центра) площадку df.

Из формулы (31) следует, что:

$$d^2Q = BdF\cos\psi d\omega;$$

$$dE = B\cos\psi d\omega.$$

Здесь d^2Q — лучистый поток в пределах $d\omega$, посылаемый площадкой dF в направлении ψ, а dE — плотность излучения в пределах $d\omega$ в направлении ψ.

Тела, для которых коэффициенты поглощения и отражения не зависят от спектра и направления падающего излучения, называются *диффузно излучающими*. Для диффузно излучающих серых тел интенсивность (яркость) собственного и отраженного излучения не зависят от направления (закон Ламберта). Из этого закона следует, что: а) лучистый поток от площадки dF в направлении ψ пропорционален $\cos\psi$; б) интенсивность как собственного, так и отраженного излучения серых тел в π раз меньше плотности полусферического излучения:

$$E = B\int_{\omega=2\pi}\cos\psi d\omega = \pi B.$$

Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными непоглощающей средой

Теплообмен излучением наблюдается либо между твердыми телами, если пространство между ними заполнено непоглощающей средой, либо как между твердыми телами, так и окружающим их газом, если газ поглощает лучистую энергию. Так как поглощение лучистой энергии происходит в тонких поверхностных слоях твердых и жидких тел, то теплообмен излучением внутри этих тел практически исключается.

В дальнейшем рассматриваются только стационарные процессы лучистого теплообмена, при которых температура тел и лучистые потоки постоянны во времени. Температура каждого тела, его поглощательная и отражательная способность предполагаются одинаковыми во всех точках поверхности. Принимается, что среда между телами не поглощает лучистой энергии.

Теплообмен излучением между черным телом *1* и черным телом *2*, произвольно расположенными в пространстве, определяется с помощью уравнения

$$Q = 4{,}90\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \cdot H \text{ ккал/час},$$

где Q — количество тепла, передаваемого излучением от тела *1* к телу *2* в результате их взаимного излучения и поглощения, в *ккал/час*; T_1 и T_2 — абсолютные температуры поверхностей тела *1* и тела *2* в °К; Величина $H = \varphi_{12}F_1 = \varphi_{21}F_2$ $м^2$ называется взаимной излучающей поверхностью тела *1* и тела *2*; F_1 и F_2 — поверхности тела *1* и тела *2*; φ_{12} и φ_{21} — средние по поверхности коэффициенты облученности тела *1* на тело *2* и тела *2* на тело *1*.

$$H = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos\psi_1\cos\psi_2}{\pi r^2} dF_2,$$

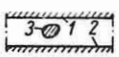
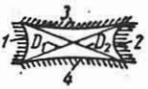
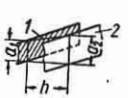
где ψ_1 и ψ_2 — углы, составляемые направлением излучения с нормалями к площадкам dF_1 и dF_2; r — расстояние между площадками; H, φ_{12} и φ_{21} — чисто геометрические параметры, зависящие только от формы и взаимного расположения тел.

В табл. 29 приведены формулы, позволяющие вычислить H, φ_{12} и φ_{21} для типичных случаев теплообмена излучением. Формулы выведены в предположении, что интенсивность (яркость) излучения тела не зависит от направления. Это строго справедливо для черных тел и достаточно точно соответствует действительности для неметаллических поверхностей и окисленных металлов.

Если имеется несколько черных тел, образующих замкнутую систему, то

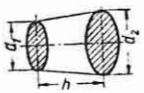
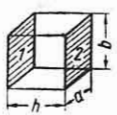
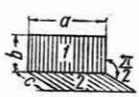
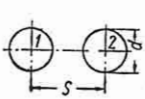
Таблица 29

Формулы для вычисления коэффициентов облученности и взаимных поверхностей в типичных случаях теплообмена излучением

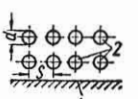
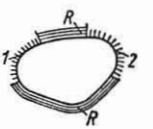
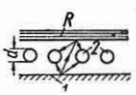
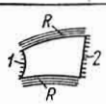
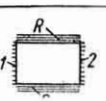
№ случая	Форма и взаимное расположение поверхностей	Схема	Коэффициенты облученности и взаимные поверхности
1	Две поверхности, образующие замкнутую систему *. Меньшая поверхность не имеет вогнутостей		$\varphi_{12}=1;\quad \varphi_{21}=\frac{F_1}{F_2};\quad H=F_1$
2	Две поверхности, образующие замкнутую систему *. Меньшая поверхность имеет вогнутости		$\varphi_{12}=\frac{D}{F_1};\quad \varphi_{21}=\frac{D}{F_2};\quad H=D$ D — поверхность, „натянутая" на соответствующий контур
3	Две параллельные стенки, размеры которых велики по сравнению с расстоянием между ними		$\varphi_{12}=\varphi_{21}=1;\quad H=F_1=F_2$
4	Две параллельные стенки и выпуклое тело		$\varphi_{12}=\varphi_{21}=1;\quad \varphi_{23}=\varphi_{13}=0;$ $\varphi_{31}=\varphi_{32}=\frac{1}{2};\quad H_{13}=H_{31}=H_{23}=\frac{1}{2}F_3$
5	Три поверхности, образующие замкнутую систему *		$\varphi_{12}=\frac{1}{2}\left(1+\frac{F_2}{F_1}-\frac{F_3}{F_1}\right);$ $H_{12}=\frac{1}{2}(F_1+F_2-F_3)$
6	Четыре поверхности, образующие замкнутую систему *		$H_{12}=\frac{1}{2}(D_1+D_2-F_3-F_4);$ $H_{13}=\frac{1}{2}(F_1+F_3-D_1);$ $H_{14}=\frac{1}{2}(F_1+F_4-D_2)$
7	Две параллельные полосы		$H=\sqrt{\frac{1}{4}(a_2+a_1)^2+h^2}-$ $-\sqrt{\frac{1}{4}(a_2-a_1)^2+h^2},$ где H отнесено к 1 $м$ длины полос

* Формулы действительны и в том случае, если 1, 2, 3, 4 и R представляют собой длинные цилиндрические поверхности с параллельными образующими. Схемы при этом следует рассматривать как поперечные сечения цилиндрических поверхностей, а F_1, F_2 и т. д. относить к 1 $м$ длины системы.

Продолжение табл. 29

№ случая	Форма и взаимное расположение поверхностей	Схема	Коэффициенты облученности и взаимные поверхности
8	Два параллельных круга с центрами на одной общей нормали к их плоскостям		$H=\frac{\pi}{4}\left\{\sqrt{\left(\frac{d_2+d_1}{2}\right)^2+h^2}-\sqrt{\left(\frac{d_2-d_1}{2}\right)^2+h^2}\right\}^2$. При $d_1=d_2$: $H=\frac{\pi}{4}\left(\sqrt{d^2+h^2}-h\right)^2$
9	Два одинаковых прямоугольника, расположенных в параллельных плоскостях друг против друга		$\varphi_{12}=\frac{2}{\pi}\left[\frac{1}{a}\sqrt{a^2+h^2}\operatorname{arctg}\frac{b}{\sqrt{a^2+h^2}}+\frac{1}{b}\sqrt{b^2+h^2}\operatorname{arctg}\frac{a}{\sqrt{b^2+h^2}}-\frac{h}{a}\operatorname{arctg}\left(\frac{b}{h}\right)-\frac{h}{b}\operatorname{arctg}\left(\frac{a}{h}\right)+\frac{h^2}{2ab}\ln\frac{(a^2+h^2)(b^2+h^2)}{(a^2+b^2+h^2)h^2}\right]$. Если $a=b$ (т. е. для квадратов), то $\varphi_{12}=\frac{2}{\pi}\left[\frac{2}{a}\sqrt{a^2+h^2}\operatorname{arctg}\frac{a}{\sqrt{a^2+h^2}}-2\frac{h}{a}\operatorname{arctg}\frac{a}{h}+\frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^2\ln\frac{(a^2+h^2)^2}{h^2(2a^2+h^2)}\right]$
10	Два взаимно перпендикулярных прямоугольника, имеющих общую грань		$\varphi_{12}=\frac{1}{\pi}\left[\operatorname{arctg}\frac{a}{b}+\frac{c}{b}\operatorname{arctg}\frac{a}{c}-\sqrt{\left(\frac{c}{a}\right)^2+1}\operatorname{arctg}\frac{a}{\sqrt{b^2+c^2}}+\frac{c^2}{4ab}\ln\frac{(a^2+b^2+c^2)c^2}{(a^2+c^2)(b^2+c^2)}+\frac{b}{4a}\ln\frac{(a^2+b^2+c^2)b^2}{(a^2+b^2)(b^2+c^2)}+\frac{a}{4b}\ln\frac{(a^2+b^2+c^2)a^2}{(a^2+b^2)(a^2+c^2)}\right]$
11	Два параллельных цилиндра одинакового диаметра		$\varphi_{12}=\frac{1}{\pi}\left(\arcsin\frac{d}{s}+\sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1}-\frac{s}{d}\right)$; $H=\sqrt{s^2-d^2}+d\arcsin\frac{d}{s}-s$, где H отнесено к 1 $м$ длины цилиндров

Продолжение табл. 29

№ случая	Форма и взаимное расположение поверхностей	Схема	Коэффициенты облученности и взаимные поверхности
12	Неограниченная плоскость и однорядный пучок труб		$\varphi'_{12} = 1 - \sqrt{1-\left(\frac{d}{s}\right)^2} + \frac{d}{s}\operatorname{arctg}\sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1}$; $\varphi'_{21} = \frac{1}{\pi}\left[\frac{s}{d} - \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1} + \operatorname{arctg}\sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1}\right]$; $H = \varphi'_{12} \cdot s = \varphi'_{21}\pi d$, где H отнесено к одной трубе и к 1 *м* длины трубы
13	Неограниченная плоскость *1* и *n*-рядный пучок труб *2*		$\varphi_{12} = 1 - \left(1-\varphi'_{12}\right)^n$; $H = \varphi_{12} s$; φ'_{12} — коэффициент облученности поверхности на однорядный пучок (см. случай 12), n — число рядов в пучке
14	Замкнутая система *, состоящая из поверхностей *1* и *2*, через которые подводится и отводится тепло, и отражающей поверхности R, не проводящей тепла		$\bar{\varphi}_{12} = \varphi_{12} + \frac{1}{\frac{1}{\varphi_{1R}} + \frac{F_1}{F_2}\frac{1}{\varphi_{2R}}}$; $\overline{H} = F_1\bar{\varphi}_{12}$; φ_{12}, φ_{1R}, φ_{2R} подсчитываются для соответствующих случаев по предыдущим формулам
14а	Частный случай № 14: неограниченная плоскость *1* и однорядный или двухрядный пучок труб *2* при наличии отражающей поверхности R, расположенной за пучком		$\bar{\varphi}_{12} = \varphi_{12}(2-\varphi_{12})$; $\overline{H} = F_1\bar{\varphi}_{12} = F_2\bar{\varphi}_{21}$ Для однорядного пучка φ_{12} вычисляется по формуле для случая № 12 $\left(\varphi_{12} = \varphi'_{12}\right)$, для двухрядного — по формуле для случая № 13 $(n=2)$
14б	Частный случай № 14: поверхности *1* и *2* не имеют вогнутостей		$\bar{\varphi}_{12} = \frac{F_2 - F_1\varphi_{12}^2}{F_1 + F_2 - 2F_1\varphi_{12}}$; $\overline{H} = F_1\bar{\varphi}_{12}$
14в	Частный случай № 14б: поверхности *1* и *2* равны и параллельны (круги, квадраты, прямоугольники и т. п.)		$\bar{\varphi}_{12} = \frac{1+\varphi_{12}}{2}$; $\overline{H} = F_1\varphi_{12}$

* Формулы действительны и в том случае, если *1*, *2*, *3*, *4* и R представляют собой длинные цилиндрические поверхности с параллельными образующими. Схемы при этом следует рассматривать как поперечные сечения цилиндрических поверхностей, а F_1, F_2 и т. д. относить к 1 *м* длины системы.

количество тепла, которое отдает поверхность тела *1* в результате теплообмена излучением с окружающими ее поверхностями тел *2*, *3* и т. д., определяется по уравнению

$$Q_1 = 4{,}90\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] F_1\varphi_{12} + \\ + 4{,}90\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_3}{100}\right)^4\right] F_1\varphi_{13} + \ldots$$

Под термином „замкнутая система" здесь и в дальнейшем понимается поверхность, ограничивающая пространство со всех сторон, а также плоскости, расстояние между которыми мало по сравнению с их размерами (случаи № 3 и 4 табл. 29), и цилиндрические поверхности, поперечные размеры которых малы по сравнению с их длиной (случаи № 1, 2, 5, 6, 14 табл. 29).

Пусть замкнутая система состоит из двух черных тел с поверхностями F_1 и F_2 и одного полностью отражающего (белого) тела с поверхностью F_R. Через поверхности черных тел подводится и отводится тепло. Отражающее тело можно рассматривать как идеальный теплоизолятор, не проводящий тепла (это условие приближенно выполняется, например, для обмуровок топок и печей, где потери через обмуровку малы по сравнению с лучистым потоком, падающим на стенки, и приблизительно компенсируются конвективной теплоотдачей внутри). Таким образом, поверхность F_R полностью отражает падающую на нее энергию. Количество тепла, которое передается в рассматриваемых условиях от черной поверхности F_1 к черной поверхности F_2, определяется по формуле

$$Q = 4{,}90\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\overline{H} \text{ ккал/час},$$

где $\overline{H} = \overline{\varphi}_{12}F_1 = \overline{\varphi}_{21}F_2$; H, $\overline{\varphi}_{12}$ и $\overline{\varphi}_{21}$ — взаимная поверхность и коэффициенты облученности, учитывающие как прямое излучение, так и отраженное излучение поверхности F_R. Для некоторых частных случаев эти новые геометрические факторы могут быть выражены через уже рассмотренные коэффициенты облученности для прямого излучения (φ_{12}, φ_{1R} и т. д.). Соответствующие формулы (случаи № 14—14в) приведены в табл. 29. Для условий, при которых справедливы формулы № 14б и 14в в табл. 29, средневзвешенная температура отражающей поверхности

$$T_R = \sqrt{\frac{(F_1 - F_1\varphi_{12})\,T_1^4 + (F_2 - F_1\varphi_{12})\,T_2^4}{(F_1 - F_1\varphi_{12}) + (F_2 - F_1\varphi_{12})}}.$$

В замкнутой системе, состоящей из двух серых тел произвольной формы, количество тепла, передаваемое от поверхности F_1 тела *1* к поверхности F_2 тела *2*, определяется по формуле

$$Q = 4{,}90\varepsilon_{пр}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] H \text{ ккал/час},$$

где $H = \varphi_{12}F_1 = \varphi_{21}F_2$; φ_{12} и φ_{21} — средние по поверхности коэффициенты облученности тела *1* на тело *2* и тела *2* на тело *1*; $\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты системы, равная

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{21}};$$

здесь ε_1 и ε_2 — степени черноты тел *1* и *2*.

Для двух неограниченных параллельных серых плоскостей ($\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$, случай № 3 табл. 29).

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Для двух серых поверхностей, образующих замкнутую систему, когда меньшая поверхность не имеет вогнутостей, $\left(\varphi_{12} = 1,\ \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}\right.$, случай № 1 табл. 29$\left.\right)$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}.$$

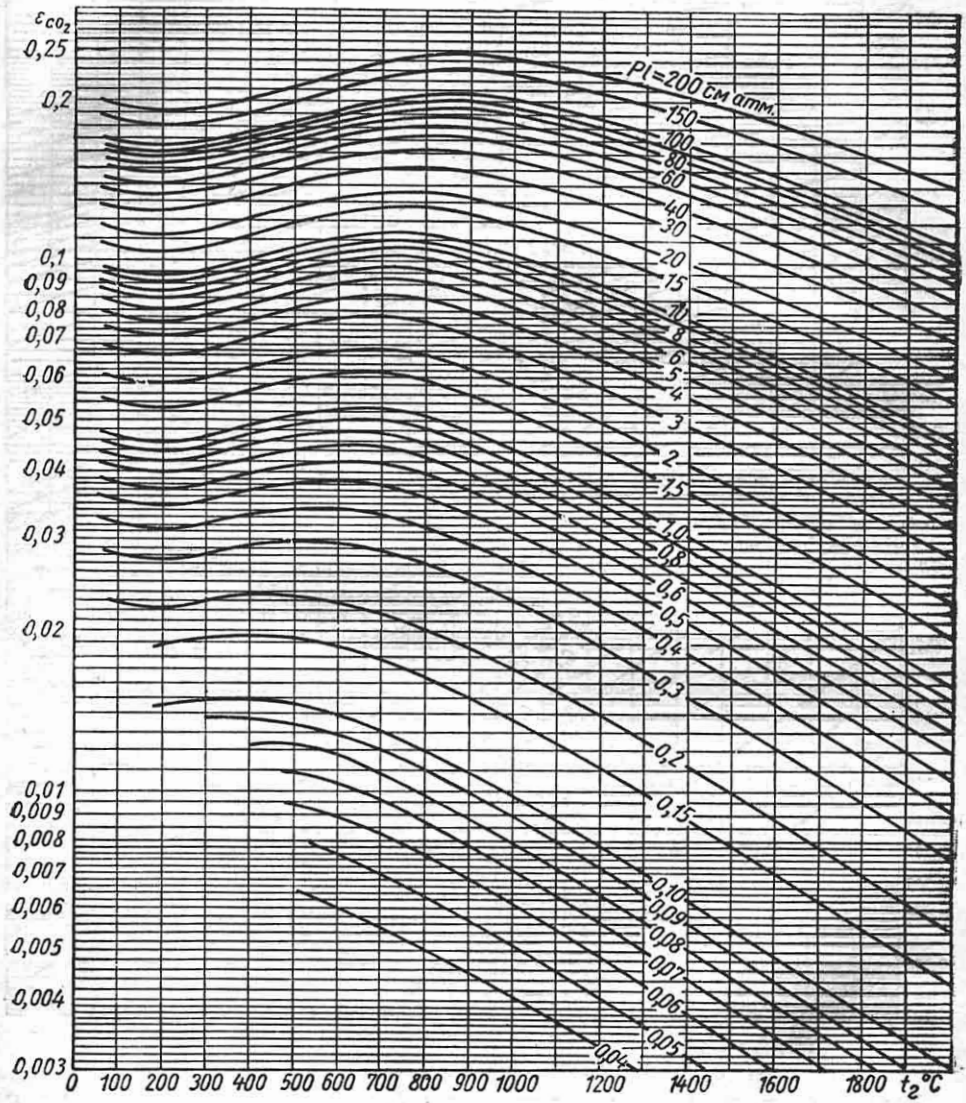
Для уменьшения передачи тепла излучением между излучающими поверхностями устанавливают экраны. В случае № 3 табл. 29 количество тепла, передаваемое от поверхности *1* к поверхности *2*, при наличии экранов оказывается в $(n + 1)$ раз меньше, чем Q при отсутствии экранов, где n — число последовательно установленных экранов (экраны предполагаются тонкими, а $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{эк}$).

Теплообмен излучением между газом и поверхностью твердого тела

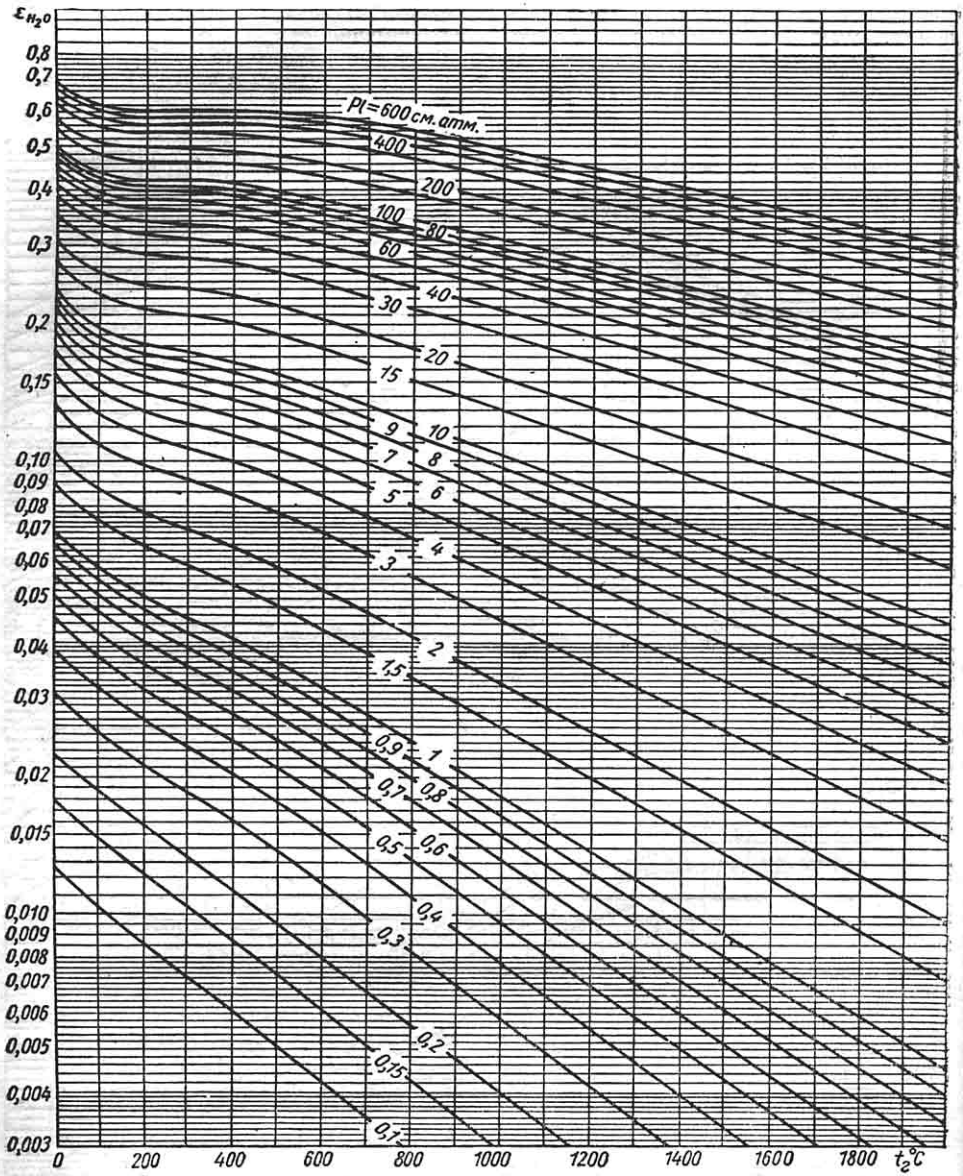
При лучистом теплообмене между газом и поверхностью твердого тела существенное значение имеет излучение

(поглощение) следующих газов, широко применяемых в технике: углекислоты (CO_2), водяного пара (H_2O), сернистого газа (SO_2), окиси углерода (CO), различных углеводородов, аммиака (NH_3), хлористого водорода (HCl) и некоторых других. Излучение одно- и двухатомных газов (кислород, водород, азот и др.) незначительно и может не приниматься во внимание.

Расчет лучистого теплообмена между газом, содержащим в качестве излучающих компонентов только CO_2 и H_2O, и окружающей его поверхностью твердого тела (стенкой) производится следующим образом [45].



Фиг. 18. Степень черноты углекислоты.



Фиг. 19. Степень черноты водяного пара.

Количество тепла, которое получает (или отдает) стенка в единицу времени вследствие излучения газа, определяется по формуле

$$Q_{из} = 4{,}90\varepsilon_э \left[\varepsilon_г \left(\frac{T_г}{100}\right)^4 - A_г \left(\frac{T_c}{100}\right)^4\right] F \text{ ккал/час}, \quad (32)$$

где $T_г$ и T_c — абсолютные температуры газа и поверхности стенки в °К; F — поверхность стенки, ограничивающей газ, в $м^2$.

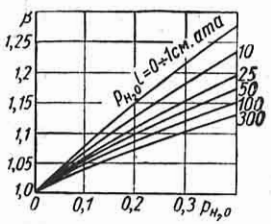
Если степень черноты стенки $\varepsilon_c = 0{,}7 \div 1$, то эффективная степень черноты стенки

$$\varepsilon_э = \frac{\varepsilon_c + 1}{2}.$$

Степень черноты газа при температуре газа $t_г$

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2} + \beta\varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon_г, \qquad (33)$$

где ε_{CO_2} — степень черноты углекислоты, определяемая по графику фиг. 18 в зависимости от произведения $p_{CO_2} \cdot l$ и $t_г$; ε_{H_2O} — степень черноты водяного пара, определяемая по графику фиг. 19 в зависимости от $p_{H_2O} \cdot l$ и $t_г$; β — поправка к ε_{H_2O} на парциальное давление H_2O, определяемая по графику фиг. 20 в зависимости от $p_{H_2O} \cdot l$ и p_{H_2O}; p_{CO_2} и p_{H_2O} — парциальные давления CO_2 и H_2O в газовой смеси в *ата*; l — эффективная толщина слоя газа в *см*; $\Delta\varepsilon_г$ — поправка, учитывающая взаимное излучение и поглощение CO_2 и H_2O [23]; при обычных технических расчетах $\Delta\varepsilon_г$ можно не принимать во внимание.



Фиг. 20. Поправка к степени черноты водяного пара.

Поглощательная способность газа при температуре стенки t_c° С

$$A_г = A_{CO_2} + A_{H_2O} - \Delta A_г,$$

где

$$A_{CO_2} = \varepsilon'_{CO_2} \cdot \left(\frac{T_г}{T_c}\right)^{0{,}65};$$

ε'_{C_2O} определяют по графику фиг. 18 в зависимости от

$$(p_{CO_2} \cdot l)' = p_{CO_2} \cdot l \left(\frac{T_c}{T_г}\right) \text{ и } t_c;$$

приближенно можно принимать

$$(p_{CO_2} \cdot l)' \approx p_{CO_2} \cdot l.$$

$$A_{H_2O} \approx \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}.$$

ε_{H_2O} — определяют по графику фиг. 19 в зависимости от $p_{H_2O} \cdot l$ и t_c; $\Delta A_г = \Delta\varepsilon_г$.

Эффективная толщина слоя газа вычисляется по формуле [11]

$$l = \frac{100mv}{F} \text{ см},$$

где $m = 3{,}6$ при $l > 100$ *см* и $m = 3{,}4$ при $l < 100$ *см*; v — объем, занятый газом в $м^3$; F — поверхность стенок, ограничивающая этот объем, в $м^2$.

Для частного случая, когда газ заполняет пространство между трубами в многорядном пучке, предыдущая формула может быть преобразована в следующую

$$l = 1{,}08 d_н \left(\frac{s_1}{d_н} \cdot \frac{s_2}{d_н} - 0{,}785\right) \text{ см},$$

где s_1 и s_2 — шаг по ширине и шаг по глубине пучка; $d_н$ — наружный диаметр труб.

Если температуры газа и поверхности не постоянны, а изменяются от $t_{г1}$ и t_{c1} в начале теплообменного устройства до $t_{г2}$ и t_{c2} в конце его, то в качестве расчетных значений приближенно можно принять

$$t_г = t_c + \frac{(t_{г1} - t_{c1}) - (t_{г2} - t_{c2})}{\ln \frac{t_{г1} - t_{c1}}{t_{г2} - t_{c2}}},$$

$$t_c = \frac{1}{2}(t_{c1} + t_{c2}).$$

Расчет теплообмена излучением в газоходах котлоагрегатов можно производить также по формуле [11]

$$Q_{из} = 4{,}90 \cdot \varepsilon_г \left(\frac{T_г}{100}\right)^4 \varphi F,$$

в которой $\varepsilon_г$ вычисляется по формуле (33); $T_г$ определяется как среднеарифметическая температура газа в начале и в конце газохода:

$$T_г = \frac{t_{г1} + t_{г2}}{2} + 273;$$

φ — поправка на обратное излучение стенки — определяется по формуле

$$\varphi = 1 - \left(\frac{T_c}{T_г}\right)^{3{,}6}.$$

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Принципы действия

Теплообменником называется аппарат, предназначенный для сообщения тепла одному из теплоносителей за счет отвода его от другого теплоносителя. Процесс подвода и отвода тепла в теплообменнике может преследовать различные

технологические цели: нагревание (охлаждение) жидкости или газа, превращение жидкости в пар, конденсацию пара, выпаривание раствора и т. д.

По принципу действия теплообменники подразделяются на *рекуперативные*, *регенеративные* и *смесительные*. *Рекуперативными* называются теплообменники, у которых передача тепла от одного теплоносителя к другому осуществляется через разделяющую их твердую стенку. *Регенеративными* называются теплообменники, у которых „горячий" теплоноситель приводится в соприкосновение с твердым телом (керамиковой или металлической насадкой), которому он отдает тепло; в последующий период в соприкосновение с этим твердым телом приводится „холодный" теплоноситель, который воспринимает тепло, аккумулированное телом. *Смесительными* называются теплообменники, у которых передача тепла от одного теплоносителя к другому осуществляется путем их непосредственного соприкосновения и, следовательно, сопровождается полным или частичным вещественным обменом.

Тепловой расчет рекуперативных теплообменников

При расчете теплообменников обычно встречаются два случая: 1) *конструктивный расчет*, когда известны параметры теплоносителей на входе и на выходе и расходы теплоносителей (или расход тепла); выбрав предварительно конструкцию теплообменника, расчетом устанавливают поверхность теплообмена; 2) *проверочный расчет*, когда известны поверхность теплообмена и конструкция аппарата и частично известны параметры и расходы теплоносителей (например, расходы теплоносителей и параметры их на входе); расчетом определяются неизвестные параметры и расходы теплоносителей (например, параметры на выходе) и другие требуемые характеристики аппарата (например, к. п. д.).

Тепловой расчет теплообменника состоит в совместном решении следующих основных уравнений:

а) уравнение теплового баланса

$$Q = -G_1 \cdot \Delta i_1 = G_2 \cdot \Delta i_2; \qquad (34)$$

б) уравнение теплопередачи

$$Q = K \cdot \overline{\Delta t} \cdot F, \qquad (35)$$

где Q — количество тепла, передаваемое одним теплоносителем другому, в *ккал/час*; G_1 и G_2 — расходы теплоносителей, соответственно отдающего и воспринимающего тепло, в *кГ/час*; Δi_1 и Δi_2 — изменения теплосодержания теплоносителей в аппарате в *ккал/кГ*; K — средний коэффициент теплопередачи в *ккал/м²час·град*; $\overline{\Delta t}$ — средний температурный напор (средняя разность температур между теплоносителями) в °С; F — расчетная поверхность теплообмена в *м²*.

Если необходимо учесть потери тепла аппаратом в окружающую среду, утечки теплоносителей или неполное омывание поверхности теплообмена, то в формулы (34) и (35) должны быть введены соответствующие добавочные члены и поправочные коэффициенты [11], [39].

В том случае, когда агрегатное состояние теплоносителя в теплообменике не изменяется,

$$\Delta i = c_p (t_1 - t_2) \ \text{ккал/кГ},$$

где t_1 и t_2 — средние по сечению (точнее, средние по теплосодержанию [23]) температуры теплоносителя на входе и на выходе из теплообменника в °С; c_p — средняя теплоемкость теплоносителя в интервале температур от t_1 до t_2 в *ккал/кГ·град*.

Если агрегатное состояние теплоносителя изменяется в результате конденсации или кипения, то

$$\Delta i = c_{pn} (t_n - t_н) + r + c_{ж} (t_н - t_{ж}).$$

где t_n и $t_{ж}$ — температуры поступающих или уходящих пара и жидкости в °С; $t_н$ — температура насыщения пара в °С; c_{pn} и $c_{ж}$ — средние теплоемкости перегретого пара и жидкости в *ккал/кГ·град*; r — теплота парообразования в *ккал/кГ*.

Средний температурный напор зависит от схемы движения теплоносителей в теплообменнике. Если температура обоих теплоносителей изменяется вдоль поверхности теплообмена, то при параллельном движении теплоносителей в одном направлении схема движения называется *прямотоком*, при параллельном движении в разных направлениях — *противотоком*, при движении под углом 90° — *перекрестным током*.

При противотоке и прямотоке

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}, \qquad (36)$$

где $\Delta t_б$ — температурный напор (разность температур обоих теплоносителей) на том конце поверхности теплообмена, где он больше; $\Delta t_м$ — температурный напор на другом конце поверхности теплообмена.

Если при противотоке произведение Gc_p — для обоих теплоносителей одинаково, то $\Delta t_б = \Delta t_м = \overline{\Delta t}$. В тех случаях, когда $\frac{\Delta t_б}{\Delta t_м} < 4{,}5$, вместо формулы (36) можно пользоваться следующей формулой [7]:

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{2}(\Delta t_б + \Delta t_м) - $$

$$- 0{,}1\,(\Delta t_б - \Delta t_м), \qquad (37)$$

что дает ошибку не более 3%, а если $\frac{\Delta t_б}{\Delta t_м} < 1{,}8$, то расчет можно производить по формуле

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{2}(\Delta t_б + \Delta t_м). \qquad (38)$$

Формулы (36), (37) и (38) неприменимы, если теплоемкость, расход или коэффициент теплоотдачи хотя бы одного из теплоносителей сильно изменяются вдоль поверхности теплообмена. В последнем случае $\overline{\Delta t}$ определяют при помощи графического интегрирования или разбивают поверхность теплообмена на участки, каждый из которых рассчитывается самостоятельно.

При перекрестном токе и в случае других более сложных схем движения теплоносителей величина $\overline{\Delta t}$ вычисляется по формуле

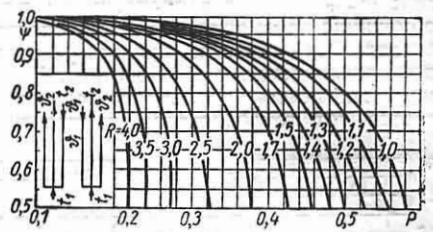
$$\overline{\Delta t} = \psi \cdot \overline{\Delta t}_{прот},$$

где $\overline{\Delta t}_{прот}$ — средний температурный напор, подсчитанный по формуле (36) для заданных температур теплоносителей в предположении, что они движутся противотоком; ψ — коэффициент перевода, который определяется по графикам, составленным для конкретных схем движения теплоносителей в зависимости от параметров P и R. На фиг. 21 дана зависимость $\psi = f(P, R)$ для параллельно смешанного тока с двумя ходами одного из теплоносителей, а на фиг. 22 — для параллельно смешанного тока с тремя ходами одного из теплоносителей [39].

На графиках для параллельно смешанного тока

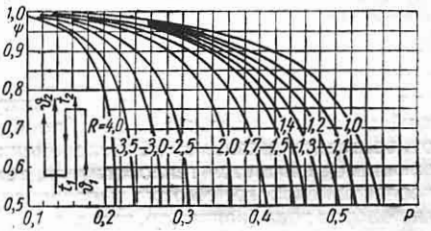
$$P = \frac{\delta t_м}{t_1 - \vartheta_1}, \quad R = \frac{\delta t_б}{\delta t_м},$$

где $\delta t_б$ — перепад температур (т. е. разность температур на входе и выходе из теплообменника) того теплоносителя, для



Фиг. 21. Коэффициент ψ для параллельно смешанного тока с двумя ходами одного из теплоносителей.

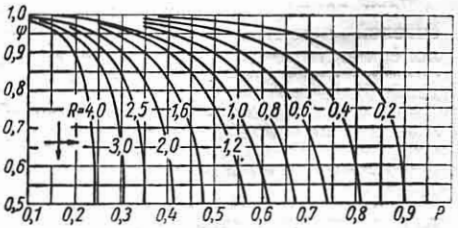
которого этот перепад больше; $\delta t_м$ — перепад температур другого теплоносителя; t_1 и ϑ_1 — начальные температуры



Фиг. 22. Коэффициент ψ для параллельно смешанного тока с тремя ходами одного из теплоносителей.

греющего и нагреваемого теплоносителей.

На фиг. 23 дана зависимость $\psi = f(P, R)$ для одноходового перекрестного движе-



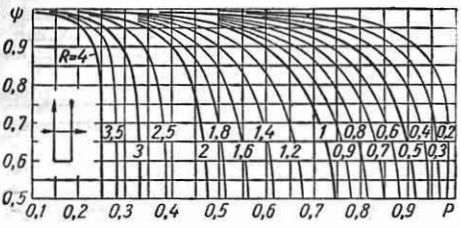
Фиг. 23. Коэффициент ψ для одноходового перекрестного тока.

ния теплоносителей, а на фиг. 24 — для двухходового перекрестного движения

теплоносителей при соединении ходов в противоточном порядке. Для перекрестного тока

$$P = \frac{\delta t_{нп}}{t_1 - \vartheta_1}, \quad R = \frac{\delta t_п}{\delta t_{нп}},$$

где t_1 и ϑ_1 — начальные температуры греющего и нагреваемого теплоносителей; $\delta t_п$ — перепад температур в теплообменнике перемешивающегося теплоносителя; $\delta t_{нп}$ — перепад температур неперемешивающегося теплоносителя. Перемешивающимся теплоносителем считается тот теплоноситель, температура



Фиг. 24. Коэффициент ψ для двухходового перекрестного тока.

которого может выравниваться поперек данного хода вследствие перемешивания (например, теплоноситель, движущийся между трубами) или вообще относительно равномерна. Неперемешивающимся считается теплоноситель, температура которого не может выравниваться поперек хода (например, при движении внутри параллельно включенных труб). Графики на фиг. 23 и 24 относятся к тому случаю, когда один из теплоносителей перемешивается, а другой не перемешивается.

Методы определения $\overline{\Delta t}$ для других схем движения теплоносителей см. [11] и [39].

Если температура одного из теплоносителей остается постоянной по всей поверхности теплообмена (например, при кипении или конденсации), то при любой схеме движения другого теплоносителя значение $\overline{\Delta t}$ определяется по формуле (36).

Коэффициент теплопередачи вычисляется по формулам: для плоских поверхностей теплообмена

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{заг}}; \qquad (39)$$

для круглых труб (в качестве расчетной принята поверхность $F = \pi d_2 l$):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}\cdot\frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{заг}}; \qquad (40)$$

для труб, сечение которых ограничено плавными кривыми ($F = U_2 l$),

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}\cdot\frac{U_2}{U_1} + \frac{2\delta U_2}{\lambda(U_1+U_2)} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{заг}}; \qquad (41)$$

для труб, имеющих снаружи ребра ($F = F_{pc}$):

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c}\right)\frac{F_{pc}}{F_c} + \frac{1}{\alpha_{2пр}} + R_{заг}}, \qquad (41а)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки в *ккал/м²·час·град*; $\alpha_{2пр}$ — приведенный коэффициент теплоотдачи со стороны оребренной поверхности; способ определения $\alpha_{2\,пр}$ — см. стр. 128 и 147; δ — толщина стенки в *м*; λ — коэффициент теплопроводности материала стенки в *ккал/м·час·град*; d_1, d_2 и l — внутренний и наружный диаметры и длина трубы в *м*; U_1 и U_2 — внутренний и наружный периметры трубы в *м*; значения δ_c, λ_c, F_{pc} и F_c см. на стр. 128; $R_{заг}$ — термические сопротивления, учитывающие загрязнения с обеих сторон стенки (накипь, сажа и пр.) в *м²час·град/ккал*. Значения $R_{заг}$ выбираются по экспериментальным данным (см., например, [11]) или вычисляются по формулам:

в уравнении (39):

$$R_{заг} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2};$$

в уравнении (40):

$$R_{заг} \approx \frac{\delta_1}{\lambda_1}\frac{d_2}{d_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2};$$

в уравнении (41):

$$R_{заг} \approx \frac{\delta_1}{\lambda_1}\cdot\frac{U_2}{U_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2},$$

если известны толщины отложений на внутренней и наружной поверхностях δ_1 и δ_2 и коэффициенты теплопроводности λ_1 и λ_2 веществ, образующих отложения.

В уравнении (40) при $\frac{d_2}{d_1} < 1{,}5$ можно принимать $\ln\frac{d_2}{d_1} \approx \frac{2\delta}{d_1+\delta}$. Совершаемая при этом ошибка не превышает 1,3% от значения $\ln\frac{d_2}{d_1}$.

В каждом конкретном случае формулы (39), (40) и (41) следует проанализировать и, если возможно, упростить, отбросив члены, лежащие за пределами требуемой точности. В большинстве случаев формулой (39) можно пользоваться не только для плоских, но и для криволинейных поверхностей (трубы разных профилей и т. п., когда $\delta \ll d$). При этом в качестве расчетной поверхности в уравнении (35) следует выбирать поверхность стенки с той стороны, где коэффициент теплоотдачи меньше. Если значения α с обеих сторон стенки приблизительно одинаковы, то в качестве расчетной выбирается средняя величина поверхности стенки снаружи и внутри.

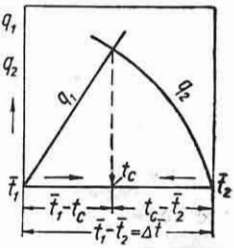
Если поверхности теплообмена омываются капельной жидкостью или неизлучающим газом, то коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 учитывают только теплоотдачу конвекцией ($\alpha = \alpha_{кон}$) и вычисляются по формулам, приведенным на стр. 143—152.

Если какая-либо поверхность омывается излучающим газом, то общий коэффициент теплоотдачи на этой поверхности

$$\alpha = \alpha_{кон} + \alpha_{из} = \alpha_{кон} + \frac{Q_{из}}{F(t_г - t_c)},$$

где $\alpha_{кон}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией; $\alpha_{из}$ — коэффициент теплоотдачи излучением; $Q_{из}$ — тепловой поток от газа к стенке или, обратно, обусловленный излучением, в *ккал/час*; F — поверхность стенки в $м^2$; $t_г$ и t_c — средние температуры газа и поверхности стенки в °С. Определение $Q_{из}$, $t_г$ и t_c — см. на стр. 160—163.

При вычислении коэффициентов теплоотдачи часто бывает необходимо знать наперед температуры обеих поверхностей стенки t_{c1} и t_{c2} или среднюю температуру стенки (если можно пренебречь ее термическим сопротивлением). В таких случаях предварительно задаются величинами t_{c1} или t_{c2}, определяют α_1, α_2 и K, а затем проверяют t_c по формулам, приведенным на стр. 126 и 127, добиваясь совпадения принятых и вычисленных значений; t_c удобно определять также графически. Задаваясь рядом значений t_c, вычисляют для них соответствующие α_1, α_2 и $q_1 = \alpha_1(\bar{t}_1 - t_c)\pi d_1$ и $q_2 = \alpha_2(t_c - \bar{t}_2)\pi d_2$, где $\bar{t}_1$ и $\bar{t}_2$ — средние температуры греющего и нагреваемого теплоносителей (предполагается, что теплообменник трубчатый).



Фиг. 25. К определению температуры стенки.

Откладывая по оси абсцисс отрезок, равный $\bar{t}_1 - \bar{t}_2 = \Delta\bar{t}$, а по оси ординат q_1 и q_2, из точек $\bar{t}_1$ и $\bar{t}_2$ строят кривые $q_1 = f_1(\bar{t}_1 - t_c)$ и $q_2 = f_2(t_c - \bar{t}_2)$, точка пересечения которых дает t_c (фиг. 25).

Некоторыми искомыми величинами при расчете теплообменников бывает необходимо предварительно задаваться. В таких случаях расчет ведется способом последовательных приближений. Последовательность операций и детали расчета зависят от конкретных условий задачи.

Гидравлический расчет теплообменников

Гидравлический расчет устанавливает затрату энергии на движение теплоносителей через аппарат. Полный напор, необходимый для движения жидкости или газа (при скорости газа, не превышающей 0,2 от скорости звука), через теплообменник определяется по формуле

$$\Delta p = \sum \Delta p_{пт} + \sum \Delta p_{мс} + \sum \Delta p_y + \Delta p_{гс} \quad кГ/м^2,$$

где $\sum \Delta p_{пт}$ — сумма гидравлических сопротивлений поверхностей теплообмена — каналов, пучков труб и т. п., не считая местных сопротивлений, которые учитываются особо; $\sum \Delta p_{мс}$ — сумма потерь напора в местных сопротивлениях; $\sum \Delta p_y$ — сумма потерь напора, обусловленных ускорением потока; $\Delta p_{гс}$ — затрата напора на преодоление гидростатического давления столба жидкости.

Определение $\Delta p_{пт}$ для труб и каналов и $\Delta p_{мс}$ см. гл. XVI, а также [40] и [23].

Гидравлическое сопротивление пучков из круглых труб при поперечном обтекании газом в области Re от $5 \cdot 10^3$ до $65 \cdot 10^3$ определяется по формулам [2]:

для шахматных пучков

$$\Delta p_{nm} = C_1 C_2 (m+1)\,\mathrm{Re}^{-0,27}\,\rho w^2 \quad кГ/м^2;$$

для коридорных пучков

$$\Delta p_{nm} = \left(1{,}36 \lg \frac{s_2}{s_1 - d} + 0{,}057\right) \times \left(\frac{75\,000}{\mathrm{Re}} \lg \frac{s_1}{s_1 - d}\right) m\rho w^2 \quad кГ/м^2,$$

где $\mathrm{Re} = \frac{wd}{\nu}$; w — скорость в узком сечении пучка, отнесенная к средней температуре газового потока, в $м/сек$; ν — кинематический коэффициент вязкости газа при температуре стенки в $м^2/сек$; ρ — плотность газа при средней температуре потока в $кГ \cdot сек^2/м^4$; m — число рядов труб по ходу газа; s_1 и s_2 — поперечный и продольный шаги труб в пучке в $м$; C_1 и C_2 — поправочные коэффициенты, зависящие соответственно от s_1 и s_2'; s_2' — расстояние между центрами труб.

Значения C_1:

$\frac{s_1}{d}$	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
C_1	3,3	2,14	1,71	1,55	1,4	1,3	1,2	1,13

Значения C_2:

$\frac{s_2'}{d}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6
C_2	0,95	0,75	0,75	0,8	0,95
$\frac{s_2'}{d}$	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5
C_2	1,02	1,05	1,09	1,1	1,1

Данные по сопротивлению пучков из ребристых труб см. [2].

Потеря напора, обусловленная ускорением потока вследствие изменения объема теплоносителя при постоянном сечении канала,

$$\Delta p_y = \rho_2 w_2^2 - \rho_1 w_1^2 \quad кГ/м^2,$$

где w_1, ρ_1 и w_2, ρ_2 — скорости в $м/сек$ и плотности газа в $кГ сек^2/м^4$ соответственно во входном и в выходном сечениях потока; для капельных жидкостей Δp_y не принимается во внимание.

Если аппарат сообщается с окружающей средой, то

$$\Delta p_{zc} = \pm h(\gamma - \gamma_0) \quad кГ/м^2,$$

где h — расстояние по вертикали между входом и выходом теплоносителя в $м$; γ и γ_0 — средний удельный вес теплоносителя и удельный вес окружающего воздуха в $кГ/м^3$. Знак плюс берется при движении теплоносителя сверху вниз, знак минус — при движении снизу вверх. Величина Δp_{zc} в случае движения газа называется сопротивлением самотяги. Если теплообменник не сообщается с окружающим воздухом (включен в замкнутую систему), то $\Delta p_{zc} = 0$.

Мощность, необходимая для перемещения жидкости или газа через аппарат, т. е. мощность на валу насоса или вентилятора, определяется по формуле

$$N = \frac{G(\Delta p + \Delta p_{mp})}{3600 \cdot 102 \cdot \gamma_1 \cdot \eta} \quad квт,$$

где G — расход жидкости или газа в $кГ/час$; γ_1 — удельный вес теплоносителя перед насосом (вентилятором) в $кГ/м^3$; Δp_{mp} — гидравлический напор, затрачиваемый в трубопроводах, в $кГ/м^2$; η — к. п. д. насоса или вентилятора.

Выбор оптимальной формы и размеров поверхности теплообмена

Величина поверхности теплообмена, а следовательно, и затрата металла на изготовление теплообменника при заданной его производительности и заданных параметрах теплоносителей определяется интенсивностью процессов теплообмена. Методы интенсификации для различных процессов теплообмена различны. Например, у теплообменников с вынужденным движением теплоносителей увеличения теплоотдачи и сокращения поверхности теплообмена можно достигнуть за счет увеличения скорости движения теплоносителей. Однако это влечет за собой одновременное увеличение расхода энергии на движение теплоносителей через аппарат. Поэтому форма и размеры поверхности теплообмена, скорости движения теплоносителей и некоторые другие характеристики

теплообменника должны выбираться так, чтобы соотношение между поверхностью теплообмена и расходом энергии на движение теплоносителей было оптимальным, т. е. экономически наиболее выгодным. Это соотношение устанавливается на основе технико-экономического расчета; см., например, [32].

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Академия Наук СССР, Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, Теория подобия и моделирование, изд. АН СССР, 1951.
2. Антуфьев В. М. и Белецкий Г. С., Теплопередача и аэродинамическое сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке, Машгиз, 1948.
3. Бабат Г. И., Дершварц Г. В., Свенчанский А. Д., Смелянский М. Я., Электрические промышленные печи, Энергоиздат, М.—Л. 1948.
4. Берман Л. Д. и Фукс С. Н., Влияние примеси воздуха на теплоотдачу при конденсации движущегося пара, „Известия ВТИ" № 11, 1952.
5. Берман Л. Д., О теории теплообмена при конденсации пара в пучке горизонтальных труб, „Известия ВТИ" № 3, 1953.
6. Ваничев А. П., „Известия АН СССР, ОТН" № 12, 1946.
7. Воскресенский К. Д., Сборник задач по теплопередаче, Энергоиздат, 1951.
8. Воскресенский К. Д., Расчет теплообмена при пленочной конденсации с учетом зависимости физических свойств конденсата от температуры, „Известия АН СССР, ОТН" № 7, 1948.
9. Вукалович М. П., Термодинамические свойства водяного пара, Машгиз, 1951.
10. Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А., Силецкий В. С. и Тимофеев В. Н., Термодинамические свойства газов, Машгиз, 1953.
11. Всесоюзный теплотехнический институт им. Ф. Э. Дзержинского, Нормы теплового расчета котельного агрегата, Энергоиздат, 1952.
12. Гухман А. А. и Илюхин Н. В., Основы учения о теплообмене при течении газа с большой скоростью, Машгиз, 1951.
13. Гурвич А. М., Теплообмен в топках паровых котлов, Энергоиздат, М.—Л. 1950.
14. Иванцов Г. П., Нагрев металла, Металлургиздат, 1948.
15. Карасина Э. С., Теплообмен в пучках труб с поперечными ребрами, „Известия ВТИ" № 12, 1952.
16. Кирпичев М. В. и Михеев М. А., Моделирование тепловых устройств, изд. АН СССР, М.—Л. 1936.
17. Кружилин Г. Н., Исследование теплового пограничного слоя, „ЖТФ" т. VI, вып. 3, 1936.
18. Кружилин Г. Н., Теплоотдача от поверхности нагрева к кипящей однокомпонентной жидкости при свободной конвекции, „Известия АН СССР, ОТН" № 7, 1948.
19. Кружилин Г. Н., Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении жидкости в условиях свободной конвекции, „Известия АН СССР, ОТН" № 5, 1949.
20. Кутателадзе С. С., Теплопередача при конденсации и кипении, Машгиз, 1952.
21. Лыков А. В., Теория теплопроводности, Техтеориздат, 1952.
22. Михеев М. А., Теплоотдача при свободном движении жидкости, „Известия АН СССР, ОТН" № 10, 1947.
23. Михеев М. А., Основы теплопередачи Энергоиздат, 1949.
24. Михеев М. А., Теплоотдача при турбулентном движении жидкости в трубах, „Известия АН СССР, ОТН" № 10, 1952.
25. Справочник по термоизоляции, Стройиздат, 1949.
26. Ларичев В. А., Качественные стали для современных котельных установок, Энергоиздат, 1951.
27. Петухов Б. С., Опытное изучение процессов теплопередачи, Энергоиздат, 1952.
28. Петухов Б. С., Экспериментальное исследование теплоотдачи при ламинарном течении жидкости в круглой трубе, „Известия АН СССР, ОТН" № 7, 1948.
29. Петухов Б. С. и Краснощеков Е. А., Исследование теплоотдачи при вязкостном режиме течения жидкости в прямоугольных каналах и круглых трубах, „Известия АН СССР, ОТН" № 6, 1953.
30. Поляк Г. Л., Анализ теплообмена излучением между диффузными поверхностями методом сальдо, „ЖТФ" т. V, вып. 3, 1935.
31. Седов Л. И., Методы подобия и размерности в механике, Техтеориздат, М.—Л. 1951.
32. Скворцов С. А., „Известия АН СССР, ОТН" № 6, 1937.
33. Суринов Ю. А., Интегральные уравнения теплового излучения и методы расчета лучистого обмена в системах „серых тел", разделенных диатермической средой, „Известия АН СССР, ОТН" № 7, 1948.
34. Суринов Ю. А., К решению задачи о лучистом обмене в системе серых тел, „Известия АН СССР, ОТН" № 9, 1950.
35. Суринов Ю. А., Лучистый теплообмен в излучающей системе, состоящей из трех серых тел, „Известия АН СССР, ОТН" № 5, 1952.
36. Тайц Н. Ю., Технология нагрева стали, Металлургиздат, 1950.
37. Тимрот Д. Л., Определение теплопроводности строительных и термоизоляционных материалов, Энергоиздат, 1932.
38. Фукс С. Н., Конденсация движущегося пара на горизонтальной трубе, „Известия ВТИ" № 3, 1953.
39. ЦКТИ, Нормы теплового расчета котельного агрегата, Машгиз, 1945.
40. ЦКТИ, Нормы аэродинамического расчета котельных агрегатов, Машгиз, 1949.
41. Шорин С. Н., Теплопередача, Стройиздат, 1952.
42. Шубин Е. П., Материалы, методы устройства и расчет тепловой изоляции трубопроводов, Энергоиздат, 1948.
43. Эйгенсон Л. С., Моделирование, „Советская наука", 1952.
44. Henning F., Wärmetechnische Richtwerte", Berlin, 1938.
45. Mc Adams W. H., Heat Transmission, New-Iork — London, 1942.

ГЛАВА IV

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Процессы горения представляют собой быстрые реакции в основном энергичного соединения горючих элементов топлива с кислородом при большом выделении тепла. Скорость реакции зависит от концентрации реагирующих веществ и температуры. С весьма малыми скоростями реакция окисления происходит и при небольших температурах, но лишь при достижении некоторого температурного предела наступает энергичная реакция соединения горючего с кислородом, т. е. *горение*. Температура, при которой тепловыделение при горении превышает теплопотери, является *температурой воспламенения*.

Горение может протекать в одной из двух предельных областей — *кинетической*, когда скорость процесса определяется скоростью химической реакции, и *диффузионной*, когда скорость процесса определяется скоростью диффузии кислорода к топливу.

Скорость распространения пламени (скорость движения пламени относительно газа) зависит от тепловыделения и объемной теплоемкости горящей смеси и теплопередачи в ней. При движении с некоторой скоростью самого газа (например, истечении) обе скорости необходимо геометрически сложить. Если действительное соотношение между горючим и кислородом сильно отличается от некоторого, близкого к теоретическому, соотношения, то тепловыделение и скорость распространения пламени уменьшаются. Последнее может снизиться до нуля (тепловыделение поглощается потерями), и горение прекращается. Эта граница характеризует пределы воспламенения: *нижний*, если смесь бедна горючим, и *верхний*, если смесь богата горючим, но в ней недостает кислорода.

Согласно редукционной теории, сгорание углерода происходит непосредственно в CO_2 с возможным восстановлением части CO_2 в CO.

По другой теории первично образуется CO, которая во вторичном процессе окисляется в CO_2. Согласно комплексной теории, при горении углерода одновременно образуются как CO, так и CO_2.

По исследованиям А. С. Предводителева и его школы суммарный процесс сгорания углерода в *слое* составляется из двух зон (стадий): кислородной (в которой образуется как CO_2, так и CO) и восстановительной. Процесс разложения углекислоты, начинающийся в кислородной зоне, переходит в чисто восстановительную зону.

Технический процесс горения сухого твердого топлива начинается с его разложения на летучие и твердый остаток — полукокс или кокс (при высоких температурах). Сгорание может быть *полным*, когда в продуктах сгорания практически не содержится горючих газов (CO, углеводороды), и *неполным* — при наличии таковых.

Неполное горение в топках и камерах горения нежелательно вследствие потери от химической неполноты горения, но в газогенераторах является одним из основных процессов. Неполное горение возникает при недостатке кислорода в камере или недостаточном его перемешивании с топливом. Поэтому для обеспечения полноты горения необходимо подавать кислород O_2 (воздух L) с некоторым избытком по сравнению с теоретическим (минимальным) количеством (O_{min} и L_{min}). Отношение

$$\frac{L}{L_{min}} = \frac{O_2}{O_{min}} = \alpha$$

называется *коэффициентом избытка воздуха*. Для твердых и жидких топлив

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21}\frac{O_2 - 0{,}5CO}{N_2}}.$$

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Теоретически необходимое (минимальное) количество кислорода воздуха определяется из реакции горения:

$C\ (12\ кГ) + O_2\ (32\ кГ) = CO_2\ (1\ моль)$, (1)

т. е. 1 $кГ$ C требует $\frac{32}{12} = 2{,}67\ кГ\ O_2$;

$H_2(2\ кГ) + 0{,}5O_2(16\ кГ) = H_2O\ (1\ моль)$, (2)

т. е. 1 $кГ$ H_2 требует $\frac{32}{4} = 8$, точнее $7{,}95\ кГ\ O_2$;

$S\ (32\ кГ) + O_2\ (32\ кГ) = SO_2\ (1\ моль)$, (3)

т. е. 1 $кГ$ S требует 1 $кГ$ O_2.

Для 1 $кГ$ рабочей части твердого или жидкого топлива, содержащего C_p весовых процентов углерода, H_p процентов водорода, $S_p^л$ процентов горючей серы и O_p процентов кислорода, теоретическое количество $кГ$ кислорода O_{min} на $кГ$ топлива составит

$$O_{min} = \frac{2{,}67C_p + 7{,}95H_p + S_p^л - O_p}{100}. \quad (4)$$

Минимальное количество воздуха (кислорода по весу в воздухе 23,2%)

$$L_{min} = \frac{100}{23{,}2} O_{min} = 0{,}115C_p + 0{,}343H_p + \\ + 0{,}043\left(S_p^л - O_p\right)\frac{кГ\ воздуха}{кГ\ топлива}. \quad (5)$$

При нормальных условиях ($\gamma_0 = 1{,}293\ кГ/нм^3$) объем воздуха

$$V_{min} = 0{,}089C_p + 0{,}266H_p + \\ + 0{,}033\left(S_p^л - O_p\right)\frac{нм^3\ воздуха^*}{кГ\ топлива}. \quad (6)$$

Так как доля $q_4\%$ топлива (механический недожог) не участвует в горении, то на 1 $кГ$ поданного в топку топлива минимальные количества воздуха (кислорода) составляют

$V_{min}\ (1 - 0{,}01q_4)$; $O_{min}\ (1 - 0{,}01q_4)$.

* Для каменных углей в формуле (6) коэффициент при $S_p^л$ 0,045, а в формуле (5) принимается равным 0,059.

Так как низшая теплопроизводительность сухого топлива $Q_н^c$ примерно пропорциональна расходу кислорода и воздуха на горение, то приближенно можно определить расход воздуха также по формуле Менделеева

$$V_{min} \approx 0{,}001KQ_н^c = 0{,}001K\left(Q_н^p + 6W\right), \quad (7)$$

где коэффициент $K = 1{,}05$ (дрова), 1,08 (торф), 1,10 (уголь, мазут).

Количество дымовых газов слагается из сухих дымовых газов объемом $V_{сг}$ на 1 $кГ$ топлива и водяных паров объемом $V_{вп}$. Газовый анализ обычно определяет состав объема сухих газов, а именно:

$$CO_2\% = \frac{V_{CO_2}}{V_{сг}} 100\%;$$

$$SO_2\% = \frac{V_{SO_2}}{V_{сг}} 100\%;$$

$$O_2\% = \frac{V_{O_2}}{V_{сг}} 100\%;$$

$$CO\% = \frac{V_{CO}}{V_{сг}} 100\%.$$

При газовом анализе трехатомные газы, обозначенные через $RO_2 = CO_2 + SO_2$, поглощаются и определяются суммарно. Кроме того, определяется O_2 и иногда CO (определение H_2 и CH_4 производится только в специальных случаях).

Имеем

$$RO_2 + CO = \frac{V_{RO_2} + V_{CO}}{V_{сг}} 100\%. \quad (8)$$

Как по уравнению $C\ (12\ кГ) + O_2 = CO_2\ (1\ моль)$, так и по уравнению $C\ (12\ кГ) + 0{,}5\,O_2 = CO\ (1\ моль)$ из 12 $кГ$ C_p образуется 1 моль ($22{,}4\ нм^3$) CO_2 или CO. Таким образом, независимо от того, происходит ли сгорание углерода в CO или CO_2, из 1 $кГ$ C образуется $\frac{22{,}4}{12} = 1{,}86\ нм^3$ газа (CO_2 или CO), т. е.

$$V_{CO_2} + V_{CO} = \frac{C}{100} 1{,}86 = \frac{C}{54}.$$

По реакции (3) образуется $0{,}68\ нм^3$ SO_2 из 1 $кГ$ S, т. е.

$$V_{SO_2} = \frac{S_p^л}{100} 0{,}68 = \frac{0{,}368S_p^л}{54},$$

отсюда

$$V_{CO_2} + V_{CO} + V_{SO_2} = \frac{C_p}{54} + \frac{0{,}368\,S_p^A}{54},$$

или

$$V_{RO_2} + V_{CO} = \frac{K_p}{54}\ \frac{нм^3}{кГ\ \text{топлива}}, \quad (8а)$$

где

$$K_p = C_p + 0{,}368 S_p^A. \quad (9)$$

Из уравнения (8) получаем формулу для определения количества сухих продуктов горения по данным *газового анализа*

$$V_{сг} = \frac{(V_{RO_2} + V_{CO})\,100\%}{RO_2 + CO} =$$

$$= \frac{K_p}{0{,}54(RO_2 + CO)}\ \frac{нм^3}{кГ\ \text{топлива}}. \quad (10)$$

При полном сгорании

$$CO = 0 \quad \text{и} \quad V_{сг} = \frac{K_p}{0{,}54 RO_2}.$$

Количество сухих газов по *элементарному составу* топлива в % можно определить из соотношения

$$V_{сг\,min} = 0{,}0888\,C_p + 0{,}209\,H_p + 0{,}0331\,S_p^A - 0{,}0263\,O_p + 0{,}008\,N_p\ \frac{нм^3}{кГ\ \text{топлива}}. \quad (10а)\ *$$

При механическом недожоге этот результат умножается на $(1-0{,}01\ q_4)$. Действительное количество сухих газов при избытке воздуха

$$V_{сг} = V_{сг\,min} + L_{min}(\alpha - 1). \quad (10б)$$

Объем водяных паров $V_{вп}$ в $\frac{нм^3}{кГ\ \text{топлива}}$

$$V_{вп} = V_{вп}^{H_2} + V_{вп}^{W} + \frac{W_L + W_\Phi}{0{,}805},$$

где $V_{вп}^{H_2}$ образован за счет сгорания водорода в количестве $9H_p$ на 1 $кГ$ H_p; $V_{вп}^{W}$ образован испарением влаги топлива; W_L и W_Φ — вес влаги воздушного и парового дутья (0,805 — удельный вес пара).

Тогда

$$V_{вп} = \frac{9H_p + W_p + 100\,(W_L + W_\Phi)}{80{,}5}. \quad (11)$$

Общий объем газов

$$V_г = V_{сг} + V_{вп}\ \frac{нм^3}{кГ\ \text{топлива}}.$$

Приближенную оценку $V_г$ без учета влаги воздуха и дутья можно также произвести по формуле

$$V_г = (a\alpha + б)\,\frac{Q_{нр} + 6W_p}{1000} + \frac{W_p}{80{,}5}\ \frac{нм^3}{кГ\ \text{топлива}}, \quad (12)$$

где для дров $a = 0{,}14$, $б = 1{,}07$; для торфа $a = 0{,}11$, $б = 1{,}09$; для бурых и пламенных углей $a = 0{,}05$ и $б = 1{,}11$; для тощих углей и антрацита $a = 0{,}02$, $б = 1{,}12$ и для мазута $a = 0{,}07$, $б = 1{,}12$.

Минимальному объему $V_{сг\,min}$ по формуле (10а) соответствует максимально возможное содержание CO_2 $\left(V_{CO_2} = \frac{1{,}86C}{100}\right)$,

$$CO_{2max} = \frac{1{,}86C_p}{100\,V_{сг\,min}} =$$

$$= \frac{1{,}86C_p}{8{,}88C_p + 20{,}9H_p + 3{,}31S_p^A - 2{,}63O_p + 0{,}8N_p}\ *$$

или после преобразования

$$CO_{2max} = \frac{21}{1 + \beta_{CO_2}}, \quad (13)$$

где

$$\beta_{CO_2} \approx$$

$$\approx \frac{2{,}37}{C}\left(H_p - \frac{O_p}{8} + \frac{S_p^A}{6} + \frac{N_p}{25}\right) + 0{,}005. \quad (13а)\ **$$

Максимальное значение RO_2 определяется аналогичным образом

$$RO_{2max} = \frac{21}{1 + \beta}, \quad (14)$$

---

* Для каменных углей коэффициент при S_p^A принимается равным 0,043.

* Для каменных углей коэффициент при S_p^A принимается равным 4,30.

** Для каменных углей $\frac{S_p^A}{5}$.

Таблица 1

Значения β и RO_{2max}

	Дрова	Торф	Бурый уголь	Подмосковный уголь	Донецкий уголь	ПЖ	Т	Антрацит	Мазут
β	0,046	0,081	0,115	0,100	0,128	0,131	0,109	0,052	0,353
RO_{2max}	20,1	19,4	18,	19,1	18,6	18,6	18,9	20,0	15,5

где

$$\beta \approx \frac{2{,}37}{K_p}\left(H_p - \frac{O_p}{8} + \frac{N_p}{25}\right) + 0{,}005. \quad (13b)^*$$

Величины β и RO_{2max} зависят только от рода топлива** (табл. 1).

При наличии в продуктах неполного сгорания только окиси углерода CO последняя определяется из теоретической формулы

$$CO = \frac{(21 - \beta RO_2) - (RO_2 + O_2)}{0{,}6 + \beta}.$$

При полном сгорании

$$CO = 0$$

и

$$RO_2 = \frac{21 - O_2}{1 + \beta}, \quad (15)$$

а при $\alpha = 1$, в продуктах сгорания $O_2 = 0$, и формула (15) обращается в (14).

При полном сгорании с достаточной точностью

$$\alpha \approx \frac{RO_{2max}}{RO_2}.$$

Для газового топлива расчеты ведутся на 1 $нм^3$. Теоретически необходимый объем воздуха

$$L_{min} = 0{,}0478\,[0{,}5H_2 + 0{,}5CO + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 3{,}5C_2H_6 + \left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n - O_2]\ \frac{нм^3}{нм^3}.$$

Действительный объем воздуха

$$L = \alpha L_{min}.$$

Объем сухих продуктов горения

$$V_{сг\,min} = 0{,}01\,(CO_2 + CO + mC_mH_n) + 0{,}791 L_{min} + 0{,}01N_2\ \frac{нм^3}{нм^3}.$$

Действительный объем сухих газов

$$V_{сг} = V_{сг\,min} + L_{min}\,(\alpha - 1)\ \frac{нм^3}{нм^3}.$$

При влагосодержании газов $d_г$ $\frac{г}{нм^3}$ и воздуха d объем водяных паров

$$V_{вп} = 0{,}01\,[H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_2 + 3C_2H_6 + \frac{n}{2}C_mH_n + 0{,}124\,(d_г + dL)]\ \frac{нм^3}{нм^3}.$$

Температура горения — температура $T_г$, до которой нагреваются при горении продукты сгорания без учета потерь тепла (теоретическая температура горения) или с учетом потерь тепла (действительная температура горения).

Теплосодержание продуктов горения

$$I_г = \sum VCT_г$$

может быть определено по тепловой диаграмме или из табл. 2. Здесь

Таблица 2

Теплосодержание продуктов горения

t° C	Теплосодержание газов в *кал/нм³*			
	N_2 и O_2	RO_2	H_2O	Воздух
100	31	41	36	31
200	62,5	86	72,5	62,5
300	94	135	110	94,5
500	159,5	239	189	160,5
700	228	352	273	230
1000	334	532	409	337
1300	445	719	556	449
1600	558	911	711	563
2000	712	1173	928	718
2400	869	1438	1154	876

* Для каменных углей в скобках добавляется $\frac{S_p^л}{20}$.

** Элементарный состав сгоревшей части топлива может несколько отличаться от состава натурального топлива вследствие механического недожога.

$C \frac{кал}{нм^3 \cdot град}$ — теплоемкость составляющего смесь газа.

Из теплового баланса в топке

$$I_{г\,топ} = I_в + Q^р_н$$

(физическим теплом топлива пренебрегаем) определяются теплосодержание и теоретическая температура газов в топке.

Понятие о детонационном (взрывном) горении.

В двигателях легкого топлива при достаточно высоких степенях сжатия процесс в камере горения может принять детонационный характер. Это вынуждает ограничивать степень сжатия и экономичность двигателя. Детонация сопровождается распространением процесса с огромными скоростями (2000 — 3000 *м/сек*), т. е. практически мгновенными повышениями давления, понижением мощности двигателя, перегревом цилиндра и поршня, ухудшением условий смазки и надежности работы двигателя. Борьба с детонацией ведется путем применения надлежащих форм камеры сгорания, подбором стойких к детонации топлив, присадкой антидетонаторов (тетраэтил свинца и др.). Антидетонационная стойкость топлива оценивается по его так называемому октановому числу, которое представляет такое процентное содержание стойкого изооктана в смеси его с детонирующим гептаном, при котором эта смесь по своим детонационным свойствам аналогична оцениваемому топливу.

Понятие о газогенераторном процессе. Газификация представляет собой процесс превращения горючей части твердого топлива в газообразное при помощи подвода кислорода (обычно с воздухом), водяного пара и др. Подвод кислорода и других газов к топливу при газификации отличает ее от сухой перегонки, осуществляемой без доступа воздуха *. Устройства для газификации называются *газогенераторами*.

Основной процесс газификации — это процесс неполного горения углерода (кокса) топлива в CO. Таким образом, процесс полного сгорания углерода

$$2C + 2O_2 = 2CO_2 + 2 \cdot 94\,250\ кал \quad (16)$$

здесь условно расчленяется на процесс *неполного* сгорания — газификацию

$$2C + O_2 = 2CO + 52\,300\ кал \quad (17)$$

и последующее догорание, т. е. использование CO в качестве газообразного топлива (вне газогенератора) — по реакции

$$2CO + O_2 = 2CO_2 + 136\,200\ кал.\ *. \quad (18)$$

Отношение теплопроизводительности образовавшегося в генераторе газа (в данном случае $2CO — 136\,200$ *кал*) к теплопроизводительности пошедшего на его образование топлива (здесь 2C, т. е. $2 \cdot 94\,250$ *кал*) называется термохимическим к. п. д. процесса η_x. В газе, горючая часть которого состоит только из CO („бедный" воздушный газ), термохимический к. п. д. $\eta_x = \frac{136\,200}{2 \cdot 94\,250} \approx$ $\approx 0{,}7$ низок. При получении воздушного газа независимо от промежуточных реакций начальные и конечные продукты определятся из

$$2C + O_2 + \frac{79}{21} N_2 =$$

$$= 2CO\ (2\ моля) + \frac{79}{21} N_2\ (3{,}77\ моля); \quad (19)$$

отсюда теоретический состав воздушного газа

$$CO = \frac{2}{2 + 3{,}77} \cdot 100 = 34{,}7\%;\ N_2 = 65{,}3\%.$$

В действительности в продуктах газификации образуется также и некоторая небольшая доля CO_2.

Низкий к. п. д. процесса для воздушного газа обусловливается потерей тепла физического подогрева газа (в дальнейшем искусственно охлаждаемого, например, перед впуском в двигатель). К. п. д. может быть существенно повышен использованием этого избытка тепла, осуществляемого обычно разложением водяного пара, подаваемого в газогенератор.

При прямом процессе газификации воздушное дутье подводится под решетку и окисляет C в CO и CO_2 (зона окисления); при дальнейшем движении

* Однако сухая перегонка некоторой части топлива иногда сопутствует окислительным и восстановительным процессам газификации.

* В действительности в газогенераторе большую роль играют процессы восстановления CO_2 в CO. Однако для расчета состава газа эту реакцию условно можно заменять реакцией (17).

вверх CO_2 восстанавливается раскаленным углеродом в CO (зона восстановления), далее газы проходят через зону коксования и подсушки топлива. Для газовых двигателей так газифицируют только бессмольные топлива (древесный уголь, антрацит). Во избежание выноса смол в двигатель остальные топлива газифицируют „обратным" процессом, при котором воздух поступает в расположенную в средней части газогенератора зону окисления, а из нее вниз — в зону восстановления.

Понятие о диссоциации продуктов горения. Реакция горения $2CO + O_2 \rightleftarrows 2CO_2 +$ тепловой эффект или $2H_2 + O_2 \rightleftarrows 2H_2O +$ тепловой эффект являются обратимыми: наряду с процессом окисления (прямая реакция) происходит также расщепление или диссоциация продуктов горения (обратная реакция с обратной затратой теплового эффекта). Соотношение между исходными и конечными продуктами прямой реакции определяются из констант равновесия, которые сильно зависят от температуры, увеличиваясь с ней по логарифмическому закону. При очень высоких температурах (более 1500° С) в продуктах горения содержится значительное количество диссоциировавших (в CO, O_2 и H_2) газов. Так как диссоциация связана с обратной затратой тепла, полученного в основной реакции — горения, то она вызывает потери энергии, пропорциональные количеству диссоциировавших газов (аналогичные потере от химической неполноты горения).

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

Теория и расчеты процессов горения

1. Зельдович Я. Б., Теория горения и детонация газов, АН СССР, 1944.

2. Кирпичев М. В., Котельные установки, т. 1, Энергоиздат, 1944.

3. Кнорре Г. Ф., под ред., Исследование процессов горения натурального топлива. Энергоиздат, 1948.

4. Предводителев А. С. и др., Горение углерода, АН СССР, 1949.

Топливо *

1. Корелин А. И., Состав и качество топлив СССР, Энергоиздат, 1940.

2. Топливо, из проекта норм теплового расчета котельных агрегатов, „Теплоэнергетик" № 2, 1954.

3. Проект норм расчета и проектирования пылеприготовительных установок, ВТИ и ЦКТИ 1953.

4. Лебедев А. Н., Пылеприготовление на электростанциях, Энергоиздат, 1949.

5. Стрижов И. Н. и Ходанович И. Е., Добыча газа, Гостоптехиздат, 1946.

6. Шишаков Н. В., Основы производства горючих газов, Энергоиздат, 1948.

* К стр. 176—192.

ГЛАВА V

ТОПЛИВО СССР

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящем разделе приводятся основные характеристики лишь для топлива, добываемого промышленностью союзного значения (в частности, для углей — предприятиями Министерства угольной промышленности СССР), причем только в той его части, какая идет для нужд энергетики. Топливо, поступающее на переработку и технологическое использование — угли на обогащение или коксование, нефть, специальные сорта сланцев и пр., здесь не представлены.

Приводимые в табл. 5, 6, 7 и 8 цифры, характеризующие состав и качество основных топлив Советского Союза, не могут рассматриваться как постоянные и твердо установленные нормативы, подобные физико-химическим константам. Это — некоторые средние числа, характеризующие топлива, значительно разнящиеся по своему составу и качеству как по отдельным производственным единицам — шахтам, торфопредприятиям и пр., так и по времени. При этом по твердому топливу (за исключением антрацитов Донбасса) приводимые характеристики относятся в основном к рядовому необогащенному и негрохоченному топливу. Отдельные потребители в соответствии со спецификой технологии топливоиспользования могут систематически получать или топливо более качественное, с характеристиками более высокими, нежели приведенные ниже, или, наоборот, ухудшенное. Это в особенности относится к его зольности — A^c. В частности, для газогенераторов, паровозов и судов обычно отгружается рядовой уголь с наименьшей зольностью, а также грохоченный или обогащенный, для электроцентралей — более зольный рядовой и отсев. Поэтому при проектировании конкретных предприятий, установок и т. п. при выборе расчетных характеристик целе-

Таблица 1

Маркировка углей Донецкого бассейна

Наименование марки	Обозначение	Выход летучих веществ на горючую массу V^z в %	Характеристика коксового остатка
Длиннопламенный	Д	Более 42	Порошкообразный или слипшийся
Газовый	Г	35—44	Спекшийся, сплавленный, иногда вспученный (рыхлый)
Паровичный жирный . . .	ПЖ	26—35	Спекшийся, сплавленный, плотный или умеренно плотный
Коксовый	К	18—26	То же
Паровичный спекающийся .	ПС	12—18	Спекшийся или сплавленный от плотного до умеренно плотного
Тощий	Т	Менее 17	Порошкообразный или слипшийся

Примечание. Угли с выходом летучих V^z от 42 до 44% могут быть отнесены к марке Г только при теплоте сгорания их горючей массы $Q_б^z$ не менее 7900 *кал*.

сообразно уточнение приводимых ниже цифр, с особенности в отношении A^c и $Q_н^p$ или же пользование специально разработанными ведомственными нормами.

Для твердого топлива в последних двух графах табл. 5 приведены основные характеристики предельно пониженного качества каждого топлива, возможность более или менее длительного поступления которого следует предусмотреть при проектировании отдельных агрегатов или предприятий.

Таблица 2

Классификация каменных и бурых углей по размеру кусков

(установлена ГОСТ 5287-50 для углей марок Д и Г Донбасса и ГОСТ 5634-51 для углей марок Б, Д, Г, ПС, Т и СС других месторождений)

Наименование класса	Условное обозначение класса	Размер кусков в *мм*
Крупный	К	50—100
Орех	О	25—50
Мелкий	М	13—25
Семечко	С	6—13[1]
Штыб	Ш	Менее 6
Рядовой	Р	Не ограничен

Примечание. Для наименования классов углей отдельных марок и их условного обозначения к наименованию класса и его условному обозначению впереди приписывается название марки, например бурый крупный – БК, газовый орех – ГО, слабо спекающийся штыб – ССШ и т. д.

При поставке углей марок Д, Г, ПС, Т и СС для сжигания в пылевидном состоянии, а также при повышенной влажности углей, взамен классов 6—13 *мм* и менее 6 *мм* выделяется класс размером кусков менее 13 *мм*, условно обозначаемый ДСШ (длиннопламенный семечко со штыбом), ГСШ, ПССШ и т. д.

При грохочении бурых углей во всех случаях класс „семечко" не выделяется, и взамен классов 6—13 *мм* и менее 6 *мм* выделяется класс менее 13 *мм* — БСШ (бурый семечко со штыбом).

При повышенной влажности бурых углей взамен классов 25—13 *мм* и менее 13 *мм* выделяется класс менее 25 *мм* — БМСШ (бурый мелкий с семечком и штыбом).

При малом выходе бурого угля класса БО 25—50 *мм* выделяется класс 13—50 *мм* — БОМ (бурый орех с мелким).

Выпуск каменных и бурых углей других размеров кусков, не предусмотренных настоящей классификацией, допускается в случаях специального назначения топлива в соответствии с установленными на него стандартами.

Размер кусков рядового угля, добываемого открытым способом, не должен превышать 300 *мм*.

[1] При грохочении бурых углей не выделяется — см. ниже.

В табл. 1 приведена действующая в настоящее время маркировка углей Донецкого бассейна.

Угли других месторождений маркируются в основном применительно к маркировке углей Донбасса. Кроме марок углей Донбасса, применяются также следующие марки и их обозначения: А — антрацит; ПА — полуантрацит; Б — бурый уголь; СС — слабо спекающийся уголь; ППМ — промежуточный продукт мокрого обогащения; ППС — то же сухого обогащения.

Классификация каменных и бурых углей и донецких антрацитов по размеру кусков приведена в табл. 2 и 3.

Таблица 3

Классификация донецких антрацитов по размеру кусков

(установлена ГОСТ 5287-50)

Наименование класса	Условное обозначение класса	Размер кусков в *мм*
Антрацит плитный	АП	Более 100
„ кулак	АК	50—100
„ орех	АО	25—50
„ мелкий	АМ	13—25
„ семечко	АС	6—13
„ штыб	АШ	Менее 6
„ рядовой (без плиты)	АРШ	Менее 100

Примечание. В отдельных случаях стандартами на качество антрацита по шахтам, при структуре пластов, не обеспечивающей кусковатость размером более 100 *мм*, может быть установлен выпуск класса АП с размером кусков более 75 *мм*, а класса АК — с размером кусков 25—75 *мм* (вместо АК крупностью 50—100 *мм* и АО крупностью 25—50 *мм*).

При рассортировке сухих антрацитов может быть выделен дополнительный класс „антрацит зубок" – АЗ с размером кусков 3—6 *мм*; в этом случае для класса АШ устанавливается размер кусков менее 3 *мм*.

Отгрузка ранее существовавшего класса АСШ с размером кусков менее 13 *мм*, не предусмотренного приведенной выше классификацией, допускается в отдельных случаях при высокой забойной влажности антрацита.

Формулы для пересчетов. Пересчет данных состава, теплоты сгорания (кроме $Q_н$) и выхода летучих с одной массы на другую производится при помощи множителей, приведенных в табл. 4.

Например:

$$C^p = C^z \cdot \frac{100 - W^p - A^p}{100}.$$

Таблица 4

С какой массы производится пересчет	Множители для пересчета на массу			
	рабочую	аналитическую	сухую	горючую
Рабочая	1	$\frac{100 - W^a}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$
Аналитическая . .	$\frac{100 - W^p}{100 - W^a}$	1	$\frac{100}{100 - W^a}$	$\frac{100}{100 - W^a - A^a}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	$\frac{100 - W^a}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горючая	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - W^a - A^a}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Теплота сгорания низшая $Q_н$ подсчитывается для каждой массы отдельно по формулам:

$$Q_н^p = Q_в^p - 6\,(W^p + 9H^p),$$

$$Q_н^c = Q_в^c - 54H^c,$$

$$Q_н^z = Q_в^z - 54H^z.$$

С горючей массы на рабочую и обратно $Q_н$ пересчитывается по формулам:

$$Q_н^p = Q_н^z \cdot \frac{100 - W^p - A^p}{100} - 6W^p,$$

$$Q_н^z = \frac{Q_н^p + 6W^p}{100 - W^p - A^p} \cdot 100.$$

Подсчет общего содержания влаги в рабочем топливе $W_{об}^p$ по данным определения внешней влаги $W_{вн}$ и влаги аналитической W^a производится по формуле

$$W_{об}^p = W_{вн} + W^a \cdot \frac{100 - W_{вн}}{100}.$$

При пересчете состава, теплоты сгорания и выхода летучих топлива, содержащего карбонатной (минеральной) углекислоты $(CO_2)_к^c$ свыше 2,0% (например, карбонатные сланцы), во всех случаях, когда в множитель входит величина A, последняя должна быть заменена на

$$A + (CO_2)_к - 2{,}5\,(S_A - S_c) - 0{,}375\,S_к,$$

т. е. к величине выхода золы должно быть прибавлено содержание минеральной углекислоты и введена поправка на образование сульфатов и окисление железа колчедана (см. примечание к табл. 5).

Основные технические данные по топливу приведены в следующих таблицах:

физико-химические характеристики твердых видов топлива СССР — в табл. 5 и 6;

специальные теплотехнические характеристики твердых видов топлива СССР — в табл. 6;

состав и теплота сгорания жидкого топлива — в табл. 7;

состав и теплота сгорания газообразного топлива — в табл. 8;

горючие и негорючие газы, смесь которых образует газообразное топливо, — в табл. 9.

ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО

Размолоспособность твердого топлива

(к табл. 6).

Под величиной лабораторного коэффициента размолоспособности $K_{ло}$ принято понимать отношение удельного расхода электроэнергии на размол эталонного лабораторного топлива, т. е. топлива с $K_{ло} = 1$, к удельному расходу электроэнергии на размол исследуемого топлива. Под лабораторным топливом в методике ВТИ принимается воздушно-сухое топливо с размером зерен 2,3 — 3,3 *мм* ($R_5 = 20\%$). Расход электроэнергии сравнивается для воздушно-сухого топлива при одинаковой указанной выше начальной крупности, одинаковой тонкости помола пыли и прочих одинаковых условиях размола.

В методике ВТИ значение коэффициента размолоспособности $K_{ло}$ получается равным 1, когда остаток пробы пыли на сите № 70, получившийся после 15-минутного размола исследуемого лабораторного топлива в фарфоровой мельнице, равен 70%, что часто получается при размоле АШ.

Связь между коэффициентом размолоспособности рабочего топлива $K_{ро}$ и $K_{ло}$ выражается формулой

$$K_{ро} = K_{ло}\frac{100 - W^a}{(100 - W^p)\cdot \Pi_{др}},$$

где $\Pi_{др}$—коэффициент пересчета на зерновой состав рабочего топлива, отличный от $R_5 = 20\%$, принимаемый для всех углей, кроме АШ, равным 1,07, а для АШ равным 1.

Соотношение между $K_{ло}$, определенным по методике ВТИ и определенными по другим методам, выражается следующими формулами:

для $K_{ло,\ ЦКТИ}$

$$K_{ло,\ ВТИ} = 0{,}34K_{ло,\ ЦКТИ} + 0{,}61,$$

для Хардгроу (США)

$$K_{ло,\ ВТИ} = \frac{K_{ло\ (Хард)} + 20}{70}.$$

Удельный кажущийся и насыпной вес угля и пыли
(к табл. 6)

Кажущийся удельный вес топлива $\gamma_{тл.\ каж}$ при его рабочей влажности W^p и зольности A^c подсчитывается по формуле

$$\gamma_{тл.\ каж} = \frac{100\cdot\gamma_{тл.\ ист}}{100 + (\gamma_{тл.\ ист} - 1)\ W_{пр}} \times \times \frac{100 - W_{пр}}{100 - W^p}\ т/м^3,$$

где $W_{пр}$ — предельно возможная влажность топлива при полном его насыщении влагой, за которую может быть условно принята W^p_{max} — см. вторую от конца графу табл. 5; $\gamma_{тл\ ист}$ — истинный удельный вес сухой массы топлива, подсчитываемый по формуле

$$\gamma_{тл.\ ист} = \frac{100\cdot\gamma_{орг}}{100 - A^c\left(1 - \frac{\gamma_{орг}}{2{,}9}\right)}\ т/м^3,$$

где $\gamma_{орг}$ — истинный удельный вес органической массы топлива в $т/м^3$.

Эта величина подсчитывается по следующим эмпирическим формулам:

а) для антрацитов и тощих углей

$$\gamma_{орг} = \frac{100}{0{,}53C^г + 5H^г}\ т/м^3,$$

б) для прочих углей

$$\gamma_{орг} = \frac{100}{0{,}334C^г + 4{,}25H^г + 23}\ т/м^3.$$

где $C^г$ — содержание углерода на горючую массу в %; $H^г$ — содержание водорода на горючую массу в %; A^c — зольность угля на сухую массу в %.

Пересчет кажущегося удельного веса топлива $\gamma_{тл.\ каж}$ с одной влажности W^p_1 на другую W^p_2 производится по формуле

$$\gamma_{тл.\ каж\ 2} = \gamma_{тл.\ каж\ 1}\frac{100 - W^p_1}{100 - W^p_2}\ т/м^3.$$

Кажущийся удельный вес пыли $\gamma_{пл.\ каж}$ может быть подсчитан по формуле

$$\gamma_{пл.\ каж} = \gamma_{тл.\ каж}\cdot\frac{100 - W^p}{100 - W^{пл}}\ т/м^3,$$

где $W^{пл}$ — общее содержание влаги в пыли.

Насыпной вес топлива с крупностью, характеризующейся остатком на сите 10×10 *см* — R_{10} в пределах 6—25%, может быть подсчитан по эмпирической формуле

$$\gamma_{тл.\ нас} = 0{,}63\gamma_{тл.\ каж}\ т/м^3.$$

Насыпной вес пыли $\gamma_{пл.\ нас}$ может быть подсчитан по формуле

$$\gamma_{пл.\ нас} = 0{,}5\gamma_{пл.\ каж} + 0{,}004R_{88}\ т/м^3,$$

где R_{88} — остаток на сите 88 *мк*.

Необходимо учитывать, что утрясенная или слежавшаяся пыль весит на 15—20% больше, а сильно разрыхленный слой пыли (например, в пылепитателях) — меньше на 20—30% величин, получающихся при подсчете по этой формуле

Основные физико-химические характе

Наименование месторождения и район	Марка и класс по крупности кусков	Влага воздушно-сухого топлива, %	Влага общая рабочего топлива, %	Сухая масса				Горючая	
								Состав	
				Зола, %	Сера общая, %	Сера сульфатная, %	Сера колчеданная, %	Сера колчеданная, %	Сера органическая, %
		W^a	W^p	A^c	$S^c_{об}$	S^c_c	$S^c_к$	$S^z_к$	$S^z_{ор}$
А. Ископаемые угли									
Донецкий бассейн	Д	4,5	13,0	22,5	4,8	0,2	2,8	3,6	2,3
	Г	3,0	7,0	17,0	3,7	0,1	2,1	2,5	1,8
	ПЖ	1,0	6,0	20,0	3,9	0,1	3,0	3,7	1,1
	Т	1,0	5,0	16,0	2,9	0,1	1,9	2,2	1,1
	ПА	1,2	5,5	16,0	2,2	0,1	1,3	1,6	0,9
	АМ и АС	2,0	5,0	14,0	1,8	0,1	1,0	1,2	0,8
	АРШ	2,0	6,0	18,0	2,0	0,1	1,2	1,5	0,8
	АШ	2,0	7,0	18,0	1,9	0,1	1,1	1,4	0,8
	ППМ	1,0	6,0 [1]	45,0	4,5	0,2	3,7	6,8	1,0
			11,0						
	Шлам	1,0	20,0	20,0	3,0	0,1	—	2,5	1,1
Кузнецкий бассейн									
Анжеро-Судженское	ПС	1,0	6,5	13,0	0,6	—	—	0,7	
Кемеровское	К-ПС-СС	1,0	9,0	17,0	0,6	—	—	0,7	
То же	ПС-Т	1,0	8,0	16,0	0,6	—	—	0,7	
Ленинское	Д	3,5	10,0	5,5	0,5	—	—	0,5	
То же	Г	2,0	9,0	12,0	0,6	—	—	0,7	
Прокопьево-Киселевское (Сталинуголь, Прокопьевскуголь и Кагановичуголь)	СС $^{2}26-35$	1,2	7,0	8,0	0,5	—	—	0,5	
	СС $^{2}18-25$	1,0	6,0	11,0	0,5	—	—	0,5	
	СС $^{2}11-17$	1,0	5,0	12,0	0,5	—	—	0,5	
Араличевское	Т	1,2	7,0	18,0	0,7	—	—	0,8	
—	ППС	1,0	4,0	26,0	0,5	—	—	0,7	
Карагандинский бассейн	ПЖ-ПС	2,0	7,5	27,0	1,0	0,05	—	1,3	
Подмосковный бассейн	Б	10,0	26,0	23,0	0,9	0,05	—	1,1	
Печорский бассейн	Б	8,0	33,0	35,0	4,5	0,2	2,5	3,9	2,7
То же	ПЖ	1,5	7,0	20,0	1,0	0,02	0,4	0,5	0,7
УССР	Д	6,0	11,0	28,0	3,0	0,2	2,1	2,9	1,0
Правобережье (Александрийское, Звенигородское, Коростышевское и др.)	Б	10,0	53,0	30,0	4,0	0,3	1,4	2,0	3,3
Западная Украина									
Золочевское (Тростянецкое)	Б	9,0	37,0	30,0	6,0	0,2	2,0	2,8	5,5
Коломыйское [6]	Б	10,0	20,0	30,0	4,5	0,1	2,9	4,2	2,1

[1] В числителе — нормальное качество топлива, в знаменателе — среднее фактическое качество от

[2] Ввиду широкого диапазона по выходу летучих углей марки СС Прокопьево-Киселевского района чих V^z для каждой группы.

Таблица 5

ристики твердых видов топлива СССР

масса

Состав				Теплота сгорания		Выход летучих %	Характеристика кокса	Рабочее топливо	Предельно пониженное качество топлива	
Углерод, %	Водород, %	Азот, %	Кислород, %	В бомбе ккал/кГ	Низшая ккал/кГ			Теплота сгорания низшая в ккал/кГ	Максимальная влажность, %	Максимальная зольность, %
C^z	H^z	N^z	O^z	$Q_б^z$	$Q_н^z$	V^z		$Q_н^p$	W_{max}^p	A_{max}^c
75,0	5,5	1,6	12,0	7730	7290	43,0	Порошкообразный или слабоспекшийся	4840	20,0	30,0
80,5	5,4	1,5	8,3	8100	7700	39,0	Спекшийся, сплавленный	5900	12,0	25,0
83,0	5,1	1,5	5,6	8400	8000	32,0	То же	5980	10,0	30,0
88,5	4,2	1,5	2,5	8550	8240	13,0	Порошкообразный или слабоспекшийся	6550	9,0	27,0
91,0	3,5	1,3	1,7	8450	8190	8,0	Порошкообразный	6470	10,0	27,0
93,5	1,8	1,0	1,7	8150	8000	4,0	То же	6500	8,0	25,0
93,0	1,8	1,0	1,9	8130	7970	4,0	„	6100	10,0	27,0
92,5	1,8	1,0	2,5	8090	7930	4,0	„	6010	10,0	30,0
79,0	5,3	1,6	6,3	8050	7600	30,0	Спекшийся	3890	8,0	50,0
								3650	15,0	
85,0	5,0	1,5	4,9	8500	8110	30,0	То же	5070	30,0	30,0
91,0	4,3	1,9	2,1	8600	8340	15,0—29,0	„	6740	10,0	18,0
86,0	5,0	2,0	6,3	8300	8000	23,0—31,0	„	5990	13,0	22,0
90,5	4,3	2,0	2,5	8550	8290	16,0 11,0—18,0	Спекшийся или порошкообразный	6360	11,0	26,0
79,0	5,5	2,4	12,6	7800	7480	40,0	То же	6300	—	—
82,5	5,8	2,7	8,3	8200	7860	39,0	Спекшийся	6240	12,0	15,0
83,0	5,2	2,3	9,0	8100	7800	30,0	То же	6640	10,0	12,0
87,5	4,7	2,2	5,1	8400	8130	22,0	„	6770	9,0	21,0
89,5	4,3	2,2	3,5	8450	8200	14,0	„	6830	8,0	16,0
89,5	4,1	2,0	3,6	8450	8200	11,0	Порошкообразный	6130	9,0	22,0
85,0	5,1	2,5	6,7	8300	8000	28,0 21,0—35,0	Спекшийся	5660	7,0	35,0
84,5	5,1	1,4	7,7	8250	7940	28,0	„	5320	12,0	32,0
73,5	4,7	0,9	19,8	6900	6620	40,0	Порошкообразный	3620	32,0	30,0
67,0	5,0	1,3	20,1	6650	6230	45,0	То же	2510	37,0	45,0
84,0	5,3	2,3	7,2	8350	8020	31,0	Спекшийся	5930	12,0	33,0
74,0	5,0	2,0	15,1	7250	6880	39,0	Порошкообразный	4340	15,0	35,0
64,0	5,8	0,6	24,3	6400	5990	60,0	То же	1650	60,0	40,0
64,0	5,2	0,8	21,7	6450	5980	57,0	„	2420	45,0 *	40,0 *
67,5	5,5	1,1	19,6	6700	6300	53,0	„	3410	—	—

гружаемого топлива в настоящее время (ввиду неналаженности сушилок).
они разделены на три группы. Цифры у наименования марки показывают пределы по выходу лету-

Наименование месторождения и район	Марка и класс по крупности кусков	Влага воздушно-сухого топлива, %	Влага общая рабочего топлива, %	Сухая масса				Горючая	
				Зола, %	Сера общая, %	Сера сульфатная, %	Сера колчеданная, %	Состав	
								Сера колчеданная, %	Сера органическая, %
		W^a	W^p	A^c	$S^c_{об}$	S^c_c	$S^c_к$	$S^z_к$	$S^z_{ор}$
Закарпатская Украина									
Мукачевское (Ильницкое	Б	7,0	45,0	40,0	0,7	0,07	—	0,6	0,5
Башкирская АССР									
Бабаевское (Ермолаевский разрез)	Б	7,0	46,0[1] / 52,0	20,0	1,5	0,1	0,6	0,7	1,0
Урал									
Кизеловское	Г	1,2	5,5	31,0	5,5	0,1	3,4	4,9	2,9
"	Д	1,5	5,5	28,0	5,0	0,1	—	6,8	
"	ППм	1,0	11,0	40,0	11,0	0,3	8,9	14,9	2,9*
Богословское	Б	11,0	28,0	30,0	0,5	0,05	—	0,6	
Челябинское	Б	9,0	17,0	30,0	1,5	0,1	0,8	1,2	0,8
Буланашское	Г	2,5	10,0	20,0	1,3	0,03	0,6	0,7	0,8
Егоршинское	А	1,3	5,0	22,0	0,5	0,05	—	0,6	
Грузинская ССР									
Ткварчельское	ПЖ	1,2	10,0	38,0	2,0	0,05	1,5	2,4	0,8
Ткибульское	Г	3,5	11,0	30,0	1,7	0,1	0,8	1,1	1,2
Гелати[6]	Б	7,5	11,0	45,0	2,3	0,1	1,7	3,0	1,0
Ахалцихское	Б	11,0	20,0	48,0	1,5	0,1	0,7	1,4	1,3*
Казахская ССР									
Иртышское[6] (Экибастуз)	СС	1,3	8,0	40,0	0,9	Следы	—	0,7	0,7
Ленгерское	Б	8,0	27,0	20,0	3,0	0,1	1,8	2,2	1,4
Узбекская ССР									
Ангрен	Б	9,0	35,0	17,0	2,3	0,1	1,1	1,3	1,3
Киргизская ССР									
Кизыл-Кия	Б	10,0	27,0	16,0	2,5	0,1	1,9	2,3	0,6
Сулюкта	Б	10,0	21,0	15,0	1,0	0,1	0,7	0,8	0,2
Кок-Янгак	Д	6,0	15,0	20,0	2,0	0,1	1,6	1,8	0,6
Ташкумыр	Д	6,0	13,0	13,0	1,0	0,03	—	1,1	
Таджикская ССР									
Шураб	Б	11,0	26,0	17,0	1,2	0,2	0,5	0,6	0,6
Красноярский край									
Канское	Б	11,0	32,0	15,0	0,8	—	—	0,5	0,4
Хакасская авт. обл.									
Минусинское	Д	3,5	13,0	12,0	0,7	0,05	—	0,2	0,5
Иркутская обл.									
Черемховское	Д	4,0	14,0	25,0	1,3	0,1	—	0,8	0,8
Бурят-Монгольская АССР									
Гусино-Озерское	Б	5,0	21,0	20,0	0,8	0,1	—	0,9	
Читинская обл.									
Тарбагатайское	Б	8,0	25,0	18,0	1,3	0,05	—	0,5	1,0
Черновское	Б	11,0	33,0	11,0	0,8	Следы	—	0,8	
Арабагарское	Б	11,0	25,0	20,0	1,0	"	—	0,4	0,8
Букачачинское	Г	3,0	8,0	13,0	0,7	—	—	0,7	
"	Д	5,0	12,0	11,0	0,6	—	—	0,6	
Хабаровский край									
Райчихинское	Б	10,5	37,0	15,0	0,3	—	—	0,3	
Кивдинское	Б	10,5	37,0	21,0	0,3	—	—	0,3	
Ургальское (Бурея)	Г	1,5	5,0	33,0	0,3	—	—	0,4	
Приморский край									
Сучанское	Г[6]	2,0	7,0	30,0	0,5	—	—	0,7	
"	ПЖ	1,5	6,0	23,0	0,5	—	—	0,6	
"	Т	1,0	6,0	25,0	0,5	—	—	0,6	

[1] В числителе — нормальное качество топлива, в знаменателе — среднее фактическое качество отгру

Продолжение табл. 5

Состав (масса)				Теплота сгорания		Выход летучих, %	Характеристика кокса	Рабочее топливо	Предельно пониженное качество топлива	
Углерод, %	Водород, %	Азот, %	Кислород, %	В бомбе ккал/кГ	Низшая ккал/кГ			Теплота сгорания низшая ккал/кГ	Максимальная влажность, %	Максимальная зольность, %
C^z	H^z	N^z	O^z	$Q_б^z$	$Q_н^z$	V^z		$Q_н^p$	W_{max}^p	A_{max}^c
64,0	5,9	0,8	28,2	6150	5800	60,0	Порошкообразный	1640	—	—
69,5	6,5	0,5	21,8	7050	6650	63,0	»	2600 [1]	48,0 [1]	30,0
								2240	60,0	
78,0	5,6	1,3	7,3	8150	7670	44,0	Спекшийся, плотный	4970	10,0	40,0
76,0	5,6	1,3 *	10,3	7850	7400	45,0	Порошкообразный или слабоспекшийся	5000	10,0	37,0
71,0	5,4	1,7	4,1	8000	7350	44,0	Спекшийся	3860	15,0	45,0
68,0	4,7	1,2	25,5	6250	5970	48,0	Порошкообразный	2840	33,0	35,0
72,0	5,2	1,7	19,1	7000	6660	43,0	»	3770	24,0	40,0
80,5	5,5	1,5	11,0	8000	7660	40,0	Слабоспекшийся	5460	15,0	—
90,0	3,6	1,3	4,5	8200	7980	9,0	Порошкообразный	5880	9,0	30,0
79,0	5,9	1,6	10,3	8000	7600	40,0	Слабоспекшийся	4180	14,0	45,0
77,0	5,7	1,5	13,5	7650	7280	43,0	Спекшийся	4470	15,0	40,0
70,0	5,2	1,5	19,3	6800	6420	43,0	Порошкообразный	3070	—	—
67,5	5,7	1,3	22,8	6600	6220	49,0	»	2470	—	—
88,0	5,3	1,5	11,8	7750	7420	32,0	Порошкообразный или слабослипшийся	4050	12,0	—
76,0	4,5	0,7	15,2	7200	6870	40,0	Порошкообразный	3850	33,0	27,0
77,5	3,7	0,7	15,5	7050	6780	34,0	»	3450	40,0	25,0
75,0	4,3	0,9	16,9	7100	6800	38,0	»	4000	32,0	21,0
77,0	4,0	0,8	17,2	7000	6750	36,0	»	4400	25,0	20,0
77,5	5,1	1,0	14,0	7600	7260	37,0	Порошкообразный или слабоспекшийся	4850	18,0	25,0
78,5	5,0	1,2	14,2	7600	7300	37,0	»	5450	18,0	20,0
76,0	4,0	0,8	18,0	6900	6680	35,0	Порошкообразный	3950	32,0	25,0
72,0	5,0	1,3	20,8	6800	6500	49,0	»	3570	37,0	25,0
78,0	5,5	2,2	13,6	7700	7380	42,0	Спекшийся	6340	20,0	20,0
77,5	5,7	1,6	13,6	7700	7350	45,0	»	4660	18,0	30,0
75,0	5,0	1,0	18,1	7200	6900	43,0	Порошкообразный	4240	25,0	30,0
74,0	5,1	1,3	18,1	7150	6830	43,0	»	4050	30,0	25,0
75,0	5,0	1,3	17,9	7200	6900	42,0	»	3910	40,0	18,0
71,0	4,9	1,4	21,5	6750	6450	45,0	»	3720	30,0	30,0
82,0	5,5	1,1	10,7	8050	7730	38,0	Спекшийся	6140	12,0	20,0
78,0	5,5	1,1	14,8	7600	7280	42,0	Порошкообразный или слабоспекшийся	5610	17,0	15,0
70,5	4,3	1,0	23,9	6400	6150	43,0	Порошкообразный	3070	45,0	21,0
71,0	4,3	1,2	23,2	6400	6150	41,0	»	2840	42,0	30,0
80,0	6,0	1,2	12,4	8000	7660	42,0	Спекшийся	4860	8,0	40,0
84,0	5,2	1,4	8,7	8100	7790	35,0	»	5030	—	—
85,5	5,0	1,4	7,5	8250	7950	29,0	Спекш., сплавленный	5720	10,0	30,0
90,0	4,0	1,0	4,4	8400	8160	11,0	Порошкообразный	5720	10,0	30,0

жаемого топлива в настоящее время (ввиду отсутствия сушилок).

Наименование месторождения и район	Марка и класс по крупности кусков	Влага воздушно-сухого топлива, %	Влага общая рабочего топлива, %	Сухая масса				Горючая	
				Зола, %	Сера общая, %	Сера сульфатная, %	Сера колчеданная, %	Состав	
								Сера колчеданная, %	Сера органическая, %
		W^a	W^p	A^c	$S^c_{об}$	S^c_c	$S^c_к$	$S^г_к$	$S^г_{ор}$
Артемовское	Б	9,0	28,0	30,0	0,4	—	—	0,5	
Тавричанское	Б	8,5	14,0	25,0	0,5	—	—	0,7	
Подгородненское	Т	1,0	5,0	40,0	0,3	—	—	0,5	
Ворошиловское	СС	0,7	5,0	42,0	0,3	—	—	0,4	
Липовецкое	Д	3,0	8,5	30,0	0,4	—	—	0,5	
О. Сахалин, север									
Мгачинское	Д	2,5	7,0	9,0	0,4	—	—	0,4	
Макарьевское	ПЖ	1,0	5,0	10,0	0,7	—	—	0,8	
Октябрьское	К	1,0	4,0	12,0	0,5	—	—	0,5	
»	Т	1,0	6,0	8,0	0,5	—	—	0,5	
О. Сахалин, юг									
	Б	8,0	18,0	15,0	0,3	—	—	0,3	
	Д	6,0	10,0	23,0	0,4	—	—	0,5	
	Г	2,5	10,0	10,0	0,4	—	—	0,4	
Б Сланцы горючие карбонатные[4]									
Эстонская ССР		0,6	15,0	46,0[a]+ +16,2	1,9	0,1	1,3	3,2	1,3
Ленинградская обл.									
Гдовское		0,6	15,0	53,5+ +17,5	1,7	0,1	1,2	3,9	1,3
Куйбышевская обл.									
Кашпирское		3,0	20,0	61,0+ +12,0	4,8	0,3	2,2	7,2	7,4
Саратовская обл.									
Савельевское		3,0	20,0	64,0+ +10,0	4,0	0,3	1,5	5,2	7,5
Озинское		3,0	21,0	65,0+ +7,0	3,5	0,3	1,6	5,3	5,2
В. Торф									
	Кусковой	11,0	40,0	11,0	0,3	—	—	0,3	
	Фрезторф	11,0	50,0	11,0	0,3	—	—	0,3	
Г. Дрова		7,0	40,0	1,0	—	—	—	—	
Д. Кокс									
Коксовая мелочь		1,0	20,0	15,0	1,5	—	—	1,6	
Древесный уголь		3,0	6,0	3,0	0,2	—	—	0,2	

Примечание. Таблица составлена по материалам топливного отделения ВТИ, отчетным данным 1953 г. стандартам на качество каменноугольного топлива. Звездочкой отмечены данные, приведенные

[a] Первое слагаемое — зола, второе — углекислота карбонатов CO_2.

[4] Для карбонатных сланцев данные по содержанию углерода C и выходу летучих V приведены с по нято: $100 - W + [A + CO_2 - 2{,}5\ (S_A - S_c) - 0{,}375 S_к]$, т. е. соответствующие пересчеты произведены с

Характеристики теплоты сгорания $Q^г_б$, $Q^г_н$ и $Q^p_н$ приведены двумя числами: в числителе — без учета остаются неразложившимися, причем за горючую массу принято то же, что и для элементарного состава; (ГОСТ 147-53), когда карбонаты в основном разлагаются. Для чисел, приведенных в знаменателе, за го

При использовании данных настоящей таблицы по карбонатным сланцам пересчет с горючей массы

для $S_к$, $S_{ор}$, C, H, N $x^p = x^г \cdot \frac{100 - W^p - A^p_{испр} - (CO_2)^p_м}{100}$, для $Q_н$ (для величин, приведенных в

$= A^c - \left[2{,}5\ (S_A - S_c)^c + 0{,}375\ S^c_к\right]$; S_A — содержание серы в лабораторной золе в виде сульфатов

При сокращенных анализах и ориентировочных подсчетах величину $\left[2{,}5\ (S_A - S_c)^c + 0{,}375 S^c_к\right]$ мож и Озинских — 2,4%.

Пересчет $Q_н$ для величин, приведенных в „знаменателе", производится по формуле $Q^p_н = Q^г_н \times$

[b] Характеристики этого топлива приведены по ограниченному количеству данных.

Продолжение табл. 5

масса								Рабочее топливо	Предельно пониженное качество топлива	
Состав				Теплота сгорания		Выход летучих, %	Характеристика кокса	Теплота сгорания низшая в *ккал/кГ*	Максимальная влажность, %	Максимальная зольность, %
Углерод, %	Водород, %	Азот, %	Кислород, %	В бомбе *ккал/кГ*	Низшая *ккал/кГ*					
C^z	H^z	N^z	O^z	$Q_б^z$	$Q_н^z$	V^z		$Q_н^p$	W^p_{max}	A^c_{max}
70,5	5,7	1,6	21,7	6850	6520	49,0	Порошкообразный	3120	32,0	35,0
74,0	5,5	1,6	18,2	7200	6870	45,0	„	4350	17,0	30,0
87,5	4,5	1,0*	6,5	8250	7990	17,0	Слипшийся	4520	—	—
84,0	5,5	1,0	9,1	8200	7880	25,0	Спекшийся	4310	—	—
76,0	6,0	1,0	16,5	7500	7160	50,0	Слабо спекшийся	4530	—	—
80,0	6,3	1,6	11,7	8100	7740	47,0	Спекшийся	6510	—	—
86,0	5,8	2,0	5,4	8600	8270	35,0	То же	7040	—	—
88,0	5,2	2,0	4,3	8650	8350	23,0	„	7030	—	—
90,0	4,6	2,0	2,9	8650	8380	16,0	Порошкообразный или спекшийся	7210	—	—
73,0	5,6	1,4	19,7	7050	6730	50,0	Порошкообразный	4520	—	—
77,0	6,0	1,6	14,9	7700	7350	46,0	То же	5030	—	—
82,5	6,0	2,0	9,1	8300	7960	40,0	Спекшийся	6390	—	—
74,0	9,5	0,3	11,7	8940	8320	90,0	Порошкообразный	2720	18,0	50,0 +18,0
				9000	8340			2590		
73,5	9,4	0,3	11,6	8870	8240	90,0	То же	2080	18,0	55,0 +20,0
				8900	8220			1940		
61,0	7,5	1,2	15,7	7210	6630	80,0	„	1510	25,0	65,0 +13,0
				7800	7130			1420		
61,0	7,7	1,2	17,4	7200	6630	80,0	„	1430	25,0	65,0 +13,0
				7700	7060			1350		
61,0	8,0	1,5	19,0	7180	6630	80,0	„	1470	25,0	68,0 +9,0
				7550	6950			1410		
57,8	6,0	2,5	33,4	5580	5240	70,0	„	2560	53,0	—
57,8	6,0	2,5	33,4	5580	5240	70,0	„	2030	55,0	—
51,0	6,1	0,6	42,3	4850	4510	85,0	Слипшийся, рыхлый	2440	45,0	—
92,0	2,0	1,5	2,9	8000	7850	6,0	Порошкообразный	5220	30,0	23,0
88,0	3,5	0,4	7,9	8000	7810	15,0	То же	7090	—	—

электростанций МЭСЭП за 1950—1953 гг. о качестве использованного ими топлива и действующим на по единичным анализам.

правкой на разложение карбонатов. За горючую массу для элементарного состава и выхода летучих при учетом углекислоты карбонатов, поправки на образование сульфатов и окисление железа колчедана

отрицательного теплового эффекта разложения карбонатов (9,7 CO_2), т. е. когда карбонаты полностью в знаменателе — по результатам калориметрических определений теплоты сгорания в обычных условиях рючую массу принято: $100 - W - A - CO_2$.
на рабочую следует производить по формулам:

„числителе") $Q_н^p = Q_н^z \cdot \frac{100 - W^p - A^p_{испр} - (CO_2)^p_м}{100} - 6W^p$, где $A^p_{испр} = A^c_{испр} \cdot \frac{100 - W^p}{100}$; $A^c_{испр} =$

(в % к массе сланца).

но принимать: для эстонских и гдовских сланцев равной 2,0%, Кашпирских — 3,8%, Савельевских — 3,1%

$$\times \frac{100 - W^p - A^p - CO_2{}^p}{100} - 6W^p$$

Таблица 6

Физико-химические и специальные теплотехнические характеристики твердых видов топлива СССР

Наименование месторождения и район	Марка и класс по крупности кусков	Характеристика плавкости золы: Средняя t_1	Средняя t_2	Средняя t_3	Пределы колебаний t_1	Пределы колебаний t_2	Пределы колебаний t_3	Коэффициент размолоспособности лаборат. $K_{ло}$	Удельный вес: кажущийся $\gamma_{тл, каж}$	Удельный вес: насыпной $\gamma_{тл, нас}$	Теплоемкость $c_{тл}$
		в °С									
А. Ископаемые угли											
Донецкий бассейн	Д	1050	1150	1200	950—1260	1050—>1400	1080—>1400	1,13	1,32	0,83	0,36
	Г	1050	1150	1220	950—1200	1000—1300	1050—1370	1,05	1,39	0,88	0,31
	ПЖ	1100	1120	1200	1000—>1400	1050—>1400	1150—>1400	1,46	1,45	0,91	0,30
	Т	1060	1230	1260	990—1170	1040—1440	1050—1470	1,80	1,37	0,86	0,26
	ПА	1060	1240	1290	970—1120	1070—>1500	1100—>1500	1,30	—	—	—
	АМ и АС	1060	1170	1200	970—1200	1030—1400	1050—1430	0,85	1,57	0,99	0,26
	АРШ	1070	1200	1250	980—1260	1000—1450	1040—1500	—	1,57	0,99	0,27
	АШ	1070	1200	1250	980—1260	1000—1450	1040—1500	0,95	1,60	1,01	0,28
	ППМ				1000—1200	1080—1420	1140—1450	1,50	1,71	1,08	0,30
	Шлам				1000—1150	1100—1350	1150—1400	—			
Кузнецкий бассейн											
Анжеро-Судженское	ПС	1150	1340	1440	1050—1200	1200—1500	1250—>1500	1,60	1,41	0,89	0,34
Кемеровское	К-ПС-СС	1090	1200	1240	1030—1150	1120—1300	1160—1350	1,39	1,41	0,89	0,33
То же	ПС-Т	1100	1240	1300	1030—1140	1120—1490	1160—>1500	—	1,36	0,86	0,32
Ленинское	Д	1130	1200	1260	1030—1260	1050—1300	1100—1400	—	1,30	0,82	0,33
То же	Г	1100	1200	1250	1050—1250	1100—1370	1150—1430	1,23	1,39	0,88	0,33
Прокопьево-Киселевское (Сталинуголь, Прокопьевскуголь и Кагановичуголь)	$СС_{26-35}$	—	—	—	—	—	—	1,99	1,38	0,87	0,31
	$СС_{18-25}$	—	—	—	1100—>1500	1240—>1500	1280—>1500	1,70	1,41	0,89	0,30
	$СС_{11-17}$	—	—	—	—	—	—	—	1,42	0,90	0,30
Араличевское	Т	1200	1360	1425	1000—1350	1260—1500	1320—>1500	1,50	1,41	0,89	0,27
—	ППС	1090	1300	1350	1000—1190	1130—1500	1180—>1500	1,22	1,54	0,97	0,29
Карагандинский бассейн	ПЖ-ПС	—	—	—	1150—>1500	1400—>1500	1450—>1500	1,40	1,47	0,93	0,32
	Б	1000	1200	1225	1090—1120	1160—1240	1175—1270	1,26	1,25	0,79	0,46
Подмосковный бассейн	Б	1350	1500	>1500	1000—>1500	1050—>1500	1100—>1500	1,75	1,29	0,81	0,51
Печорский бассейн	ПЖ	1050	1225	1280	1000—1150	1100—1300	1150—1400	1,40	1,41	0,89	0,31
То же	Д	1050	1130	1150	1000—1125	1080—1200	1125—1240	1,15	1,46	0,92	0,34
УССР											
Правобережье (Александрийское, Звенигородское, Коростышевское и др.)	Б	—	—	—	1050—1480	1100—>1500	1130—>1500	—	1,02	0,64	0,66
Западная Украина											
Золочевское (Тростянецкое)	Б	1050	1120	1150	1000—1100	1060—1180	1090—1200	1,45	1,13	0,71	0,54
Коломыйское *	Б	1030	1050	1070	—	—	—	—	1,38	0,87	0,42
Закарпатская Украина											
Мукачевское (Ильницкое)	Б	1120	1300	1310	1000—1240	1160—1450	1160—1470	0,80	1,19	0,75	0,60
Башкирская АССР											
Бабаевское (Ермолаевский разрез)	Б	1120	1200	1220	1000—1200	1150—1250	1170—1260	1,8	1,10 / 1,06	0,69 / 0,67	0,61 / 0,65

Урал											
Кизеловское	Г	1150	1410	1450	960—1470	1150—>1500	1200—>1500	1,0	1,52	0,96	0,30
То же	Д	1130	1410	1440	990—1220	1300—>1500	1350—>1500	—	1,50	0,95	0,30
„	ППм	1000*	1140*	1170*	—	—	—	—	1,53	0,97	0,34
Богословское	Б	1150	1350	1400	1050—>1500	1100—>1500	1150—>1500	1,10	1,29	0,81	0,47
Челябинское	Б	1050	1150	1220	1000—1150	1100—1350	1150—1400	1,15	1,33	0,84	0,39
Буланашское	Г	1200	1275	1300	—	—	—	1,33	1,39	0,88	0,33
Егоршинское	А	>1500	—		1350—>1500	1450—>1500	>1500	1,45	1,47	0,93	0,26
Грузинская ССР											
Ткварчельское	ПЖ	1450	>1500	—	1400—>1500	>1500	—	1,41	1,53	0,97	0,33
Ткибульское	Г	1450	>1500	—	1300—>1500	1350—>1500	1370—>1500	1,37	1,47	0,93	0,34
Гелати *	Б	>1500	—	—	—	—	—	—	1,54	0,97	0,35
Ахалцихское	Б	1290	1380	1400	—	—	—	0,98	1,42	0,90	0,42
Казахская ССР											
Иртышское * (Экибастуз)	СС	1400	1500	>1500	1300—>1500	1375—>1500	1450—>1500	1,35	1,53	0,96	0,31
Ленгеровское	Б	1020	1100	1150	1000—1050	1050—1200	1050—1270	1,43	1,23	0,78	0,47
Узбекская ССР											
Ангрен	Б	1120	1210	1230	1040—1240	1100—1360	1130—1375	1,90	1,18	0,74	0,53
Киргизская ССР											
Кизыл-Кия	Б	1050	1100	1150	1000—1250	1030—1300	1050—1350	1,46	1,24	0,78	0,47
Сулюкта	Б	1130	1250	1280	1030—1300	1120—1360	1180—1380	1,30	1,30	0,82	0,42
Кок-Янгак	Д	1100	1250	1350	1000—>1500	1080—>1500	1100—>1500	1,08	1,40	0,88	0,37
Ташкумыр	Д	1200	1300	1350	1050—1500	1150—>1500	1170—>1500	1,28	1,32	0,83	0,36
Таджикская ССР											
Шураб	Б	1120	1200	1230	1050—1350	1100—1400	1130—1420	1,35	—	—	—
Красноярский край											
Канское	Б	1150	1250	1270	1000—1300	1100—1375	1130—1400	1,24	1,20	0,76	0,50
Хакасская авт. обл.											
Минусинское	Д	1150	1300	1350	1100—1200	1200—1350	1280—1380	0,88	1,27	0,80	0,36
Иркутская обл.											
Черемховское	Д	1130	1240	1275	1000—>1500	1100—>1500	1120—>1500	1,30	1,41	0,89	0,36
Бурят-Монгольская АССР											
Гусино-Озерское	Б	1050	1160	1220	1000—1160	1050—1350	1070—1380	1,29	1,32	0,83	0,42
Читинская обл.											
Тарбагатайское	Б	1050	1200	1240	1000—1120	1040—1330	1050—1450	1,02	1,26	0,79	0,45
Черновское	Б	1050	1150	1200	1030—1080	1100—1200	1130—1280	1,20	1,13	0,71	0,51
Арабагарское	Б	1070	1160	1210	1000—1130	1150—1175	1160—1260	0,97	1,27	0,80	0,45
Букачачинское	Г	1200	1300	1350	1050—1400	1150—1500	1170—>1500	1,35	1,39	0,88	0,32
То же	Д	1050	1150	1170	1000—1110	1100—1250	1120—1270	—	1,32	0,83	0,35
Хабаровский край											
Райчихинское	Б	1090	1240	1275	1000—1180	1130—1300	1200—1310	1,37	1,09	0,69	0,54
Кивдинское	Б	1050	1200	1250	1040—1060	1100—1250	1200—1300	1,26	1,18	0,74	0,54
Ургальское (Бурея)	Г	1370	>1500	>1500	1100—>1500	1400—>1500	1450—>1500	0,80	1,58	1,00	0,30

Продолжение табл. 6

Наименование месторождения и район	Марка и класс по крупности кусков	Характеристика плавкости золы: Средняя t_1	Средняя t_2	Средняя t_3	Пределы колебаний t_1	Пределы колебаний t_2	Пределы колебаний t_3	Коэффициент размолоспособности лаборат. $K_{ло}$	Удельный вес: кажущийся $\gamma_{тл,\,каж}$	Удельный вес: насыпной $\gamma_{тл,\,нас}$	Теплоемкость $c_{тл}$
		в °С									
Приморский край											
Сучанское	Г*	—	—	—	—	—	—	—	1,48	0,93	0,31
То же	ПЖ	1130	1300	1350	1050—1220	1150—1500	1200—>1500	—	1,47	0,93	0,30
„	Т*	1100	1250	1280	—	—	—	1,31	1,44	0,91	0,27
Артемовское	Б	1125	1240	1280	1030—1350	1110—1450	1125—1475	0,92	1,31	0,83	0,47
Тавричанское	Б	1175	1350	1400	1050—1400	1100—>1500	1200—>1500	0,92	1,43	0,90	0,37
Подгородненское	Т	1260	1400	1430	1050—1420	1230—>1500	1270—>1500	1,06	1,58	1,00	0,26
Ворошиловское	СС	1450	>1500		1300—>1500	>1500	—	1,35	1,58	1,00	0,30
Липовецкое	Д	—	—	—	—	—	—	—	1,44	0,91	0,32
О. Сахалин, север											
Мгачинское	Д	1160	1225	1260	1025—1235	1120—1310	1130—1390				
Макарьевское	ПЖ	—	—	—	1070—1150	1160—1290	1210—1325				
Октябрьское	К	—	—	—	1230—1360*	1310—1450*	1330—1465*				
То же	Т	1200*	1260*	1280*	—	—	—				
О. Сахалин, юг											
	Б	1120	1290	1340	970—1320	1070—>1500	1080—>1500				
	Д	1130	1280	1330	1000—1340	1150—>1500	1180—>1500				
	Г	1200	1340	1350	1000—1350	1120—1400	1150—1430				
Б. Сланцы горючие карбонатные											
Эстонская ССР		1220	1400	1430	1150—1400	1275—>1500	1300—>1500	2,50	1,68	1,06	0,33
Ленинградская обл.											
Гдовское		1250	1360	1375	1140—1430	1220—>1500	1230—>1500	2,48	1,75	1,12	0,33
Куйбышевская обл.											
Кашпирское		1050	1120	1140	980—1090	1020—1170	1040—1180	1,30	1,59	1,00	0,37
Саратовская обл.											
Савельевское		1120	1200	1230	1000—1320	1060—1390	1140—1400	1,00	1,60	1,01	0,37
Озинское		1075*	1170*	1190*	—	—	—	1,00	1,62	1,02	0,38
В. Торф											
	Кусковой	—	—	—	800—1400	1000—1500	1010—>1500	—	—	—	—
	Фрезерный	—	—	—				—	1,06	0,67	0,61

Примечания: 1. Таблица составлена по материалам ВТИ: графы 3—8 — топливного отделения, графы 9—12 — топочного.
2. Значение звездочек у некоторых данных, марок и месторождений — то же, что и в табл. 5.

Таблица 7

Состав и теплота сгорания жидкого топлива[1]

Топливо	Марка	Влага рабочего топлива в %	Сухая масса		Горючая масса						Удельный вес (плотность)	Теплота сгорания низшая рабочего топлива в *ккал/кГ*
			Зола в %	Сера в %	Сера в %	Углерод в %	Водород в %	Кислород с азотом в %	Теплота сгорания в *ккал/кГ*			
									высшая	низшая		
		W^p	A^c	S^c	S^z	C^z	H^z	$(O+N)^z$	$Q_в^z$	$Q_н^z$	γ_4^{20}	$Q_н^p$
Бензин . . .	—	0	0	0,05	0,05	85,0	14,9	0,05	11 250	10 450	0,70—0,76	10 450
Керосин . . .	—	0	0	0,2	0,2	86,0	13,7	0,1	11 000	10 260	0,82—0,85	10 260
Дизельное автотракторное	—	Следы	Следы	0,3	0,3	86,3	13,3	0,1	10 900	10 180	0,84—0,88	10 180
Соляровое масло . . .	—	„	0,02	0,3	0,3	86,5	12,8	0,4	10 800	10 110	0,86—0,92	10 110
Моторное топливо . .	—	1,5	0,05	0,4	0,4	86,5	12,6	0,5	10 700	10 020	0,87—0,94	9 880
Мазут малосернистый . . .	20 и 40	1,0	0,1	0,6	0,6	87,3	11,5	0,6	10 420	9 800		9 700
То же	60 и 80	2,0	0,2	0,5	0,5	88,0	10,8	0,7	10 280	9 700		9 490
„	100	3,0	0,3	0,5	0,5	88,2	10,5	0,8	10 210	9 640	<0,99	9 330
Мазут высокосернистый .	20 и 40	1,0	0,1	2,6	2,6	85,6	11,3	0,5	10 260	9 650		9 550
То же	60 и 80	2,0	0,2	2,8	2,8	86,0	10,6	0,6	10 120	9 550		9 350
„	100	3,0	0,3	3,0	3,0	86,2	10,3	0,5	10 060	9 500	<0,99	9 200

[1] Таблица составлена по материалам топливного отделения ВТИ.

Теплоемкость твердого топлива и угольной пыли (к табл. 6).

Теплоемкость топлива $c_{тл}$ и теплоемкость пыли $c_{пл}$ определяются по формуле

$$c_{тл}\ (\text{или}\ c_{пл}) = \frac{W^p}{100} + \frac{A^p}{100}\cdot C^a + \frac{100 - W^p - A^p}{100}\cdot c^z\ ккал/кГ\cdot град,$$

где c^a — теплоемкость золы, вычисляемая по выражению

$$c^a = 0{,}17 + \frac{0{,}12}{1000}\,t_{тл}\ ккал/кГ\cdot град,$$

c^z — теплоемкость горючей массы топлива, равная

$$c^z = 0{,}2 + \frac{9\,(13 + V^z)\cdot(130 + t_{тл})}{1000000}\ ккал/кГ\cdot град,$$

$t_{тл}$ — температура топлива перед сушильно-мельничной системой в °; W^p — влажность топлива в %; A^p — зольность топлива; V^z — выход летучих на горючую массу топлива в %.

При тепловых расчетах пылеприготовительных установок средняя теплоемкость угля и пыли (при температурах до 200°) с достаточной точностью может быть определена по формулам:

$$c_{тл} = \frac{W^p}{100} + \frac{100 - W^p}{100}\,c^c_{тл}\ ккал/кГ\cdot град;$$

$$c_{пл} = \frac{W^{пл}}{100} + \frac{100 - W^{пл}}{100}\,c^c_{тл}\ ккал/кГ\cdot град,$$

где $c^c_{тл}$ — теплоемкость сухой массы топлива.

Значение этой величины может быть принято:

для антрацитов и тощих углей . .	$c^c_{тл}$ = 0,22	*ккал/кГ·град*
для каменных углей	0,26	„
для бурых углей и фрезторфа . . .	0,27	„
для сланцев	0,21	„

ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО

(к табл. 8)

В таблице газообразного топлива теплота сгорания и вес 1 $нм^3$ подсчитаны по следующим формулам:

$$Q^c_н = 55{,}9H_2S + 141{,}1C_mH_n + 30{,}2CO + 25{,}8H_2 + \ldots\ ккал/нм^3;$$

$$\gamma^c = 0{,}0152H_2S + 0{,}01964CO_2 + 0{,}01251C_mH_n + 0{,}01428O_2 + \ldots\ кГ/нм^3,$$

где H_2S, C_mH_n, CO и т. д. — содержа-

Таблица 8

Состав и теплота сгорания газообразного топлива

Наименование газа	Состав газа в объемных процентах												Теплота сгорания низшая сухого газа $Q_н^c$ в *ккал/нм³*	Вес нормального кубометра γ^c в *кГ*
	H_2S	CO_2	C_mH_n	O_2	CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	N_2		
I. Газ доменных печей														
Древесноугольных	—	12,0	—	—	27,0	8,0	1,6	—	—	—	—	51,4	1157	1,238
Коксовых	0,3	10,2	—	—	28,0	2,7	0,3	—	—	—	—	58,5	957	1,296
II. Генераторный газ														
Из кускового топлива														
Коксовая мелочь	0,2	5,0	—	0,2	28,5	13,0	0,7	—	—	—	—	52,4	1265	1,136
Антрацит донецкий	0,2	5,5	—	0,2	27,5	13,5	0,5	—	—	—	—	52,6	1230	1,135
Сулюктинский уголь	0,2	5,0	0,1	0,2	29,0	14,6	0,8	—	—	—	—	50,1	1343	1,116
Богословский	—	8,0	0,3	0,2	24,0	13,6	2,2	—	—	—	—	51,7	1303	1,142
Газовый донецкий уголь	0,3	5,0	0,3	0,2	26,5	13,5	2,3	—	—	—	—	51,9	1402	1,122
Лисичанский уголь	1,0	7,0	0,3	0,2	25,0	15,0	2,5	—	—	—	—	49,0	1451	1,119
Черемховский	0,1	7,0	0,4	0,2	25,5	15,5	2,6	—	—	—	—	48,7	1452	1,110
Челябинский уголь	0,2	5,0	0,2	0,2	30,0	13,0	2,0	—	—	—	—	49,4	1449	1,128
Подмосковный уголь	1,2	6,5	0,3	0,2	25,0	14,0	2,2	—	—	—	—	50,6	1411	1,130
Торф машино-формовочный	0,1	8,0	0,4	0,2	28,0	15,0	3,0	—	—	—	—	45,3	1548	1,121
Гидроторф	0,1	8,5	0,4	0,2	27,5	15,0	2,5	—	—	—	—	45,8	1491	1,127
Древесина (щепа)	—	6,5	0,4	0,2	29,0	14,0	3,0	—	—	—	—	46,9	1547	1,122
Из мелкозернистого топлива (0—6 мм) (Газификация во взвешенном слое)														
Фрезерный торф *	—	9,8	0,7	0,2	20,3	10,9	1,9	—	—	—	—	56,2	1154	1,188
Подмосковный уголь *	0,4	6,9	0,4	0,2	21,7	7,1	1,1	—	—	—	—	62,2	1010	1,217

Продолжение табл. 8

Наименование газа	Состав газа в объемных процентах												Теплота сгорания низшая сухого газа $Q_н^c$ в ккал/нм³	Вес нормального кубометра γ^c в кг
	H_2S	CO_2	C_mH_n	O_2	CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	N_2		
III. Водяной газ[1]														
Из кокса	0,3	6,5	—	0,2	37,0	50,0	0,5	—	—	—	—	5,5	2466	0,715
Из антрацита	0,5	6,0	—	0,2	38,5	48,0	0,5	—	—	—	—	6,3	2471	0,736
IV. Газ воздушной продувки при процессе водяного газа														
Из кокса	0,1	17,5	—	0,2	5,0	1,3	—	—	—	—	—	75,9	190	1,366
Из антрацита	0,1	14,5	—	0,2	8,8	2,3	0,2	—	—	—	—	73,9	348	1,332
V. Газ коксовых печей														
Очищенный	0,4	2,3	1,9	0,8	6,8	57,5	22,5	—	—	—	—	7,8	3924	0,483
Неочищенный	0,4	2,3	2,7[2]	0,8	6,8	57,0	22,3	—	—	—	—	7,7	4142	0,507
VI. Газ переработки нефти														
Газ пиролиза	—	0,5	31,0[3]	—	0,8	14,0	41,0	12,0	—	—		0,2	11322	0,996
VII. Природный газ чисто газовых месторождений														
Ухтинский	Следы	0,3	—	—	—	—	88,0	1,9	0,2	0,3	0	9,3	7946	0,789
Бугурусланский	1,0	0,2	—	—	—	—	76,7	4,5	1,7	0,8	0,6	14,5	8109	0,884
Курдюмский	Следы	—	—	—	—	—	92,2	0,8	—	0,1	0	6,9	8039	0,759
Елшанский (Саратовский)	.	0,2	—	—	—	—	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	3,3	8560	0,765
Мелитопольский	.	0,2	—	—	—	—	97,9			0,1		1,8	8391	0,729
Дашавский (Зап. Украина)	.	0,1	—	—	—	—	97,9	0,5	0,2	0,1	0	1,2	8523	0,730

Примечание. Таблица составлена совместно с Н. В. Шишаковым и под его руководством [5], [6].

[1] Для крупных станций водяного газа, оборудованных газогенераторами с диаметром шахты 3,6 *м*.
[2] В том числе бензола C_6H_6 — 0,8%.
[3] В том числе C_2H_4 — 17,0%, C_3H_6 — 9,0%, C_4H_8 — 5,0%.

ние в объемных процентах соответствующих индивидуальных газов в топливе; значение цифровых коэффициентов — см. табл. 9.

Таблица 9

Горючие и негорючие индивидуальные газы, смесь которых образует газообразное топливо

Наименование	Символ	Вес 1 *нм*³ в *кГ* $\gamma_{0,760}$	Теплота сгорания низшая сухого газа в *ккал/нм*³ $Q_н^c$
Сероводород . .	H_2S	1,520	5 585
Углекислота . .	CO_2	1,964	—
Этилен	C_2H_4	1,251	14 107
Пропилен	C_3H_6	1,877	20 541
Бутилен	C_4H_8	2,503	27 111
Кислород	O_2	1,428	—
Окись углерода	CO	1,250	3 018
Водород	H_2	0,090	2 579
Метан	CH_4	0,716	8 555
Этан	C_2H_6	1,342	15 226
Пропан	C_3H_8	1,967	21 795
Бутан	C_4H_{10}	2,593	28 338
Пентан	C_5H_{12}	3,218	34 890
Азот элементарный	N_2	1,251	—
Азот воздуха . .	N_2	1,257	—
Сернистый газ .	SO_2	2,858	—
Бензол	C_6H_6	3,485	33 528
Воздух		1,293	—

Примечания: 1. γ и $Q_н^c$ подсчитаны, принимая объем грамм-молекулы газа равным 22,414 *л* (как для идеального газа).

2. γ и $Q_н^c$ непредельных углеводородов C_mH_n при подсчетах обычно принимаются по соответствующим константам для этилена (C_2H_4), а для газа коксовых печей, в группе непредельных углеводородов которого содержатся бутилен и бензол, $Q_н^c$ принимается 17 000 *ккал/нм*³.

Вес 1 *нм*³ газа с содержанием влаги *d Г* на 1 *нм*³ сухого газа выражается формулой

$$\gamma_{0,760}^{влажн} = \frac{\gamma^c + \frac{d}{1000}}{1 + \frac{d}{804}}.$$

При пользовании характеристиками для газообразного топлива необходимо также иметь в виду следующее.

Доменный газ. Перед поступлением к потребителю доменный газ подвергается охлаждению и предварительной очистке от пыли в скрубберах или дезинтеграторах. Потребителю подается газ, насыщенный влагой, с содержанием пыли 0,1 – 1,0 *Г/нм*³ (скрубберная очистка) и 0,01—0,3 *Г/нм*³ (очистка в дезинтеграторах). Неочищенный доменный газ содержит пыли 7—12 *Г/нм*³, содержание углерода в пыли 3—5%. Доменный газ при выплавке ферросилиция содержит значительно большее количество пыли, и при сухом способе очистки, рассчитанной на обычный газ, запыленность газа получается более высокой. Смолы в газе практически нет.

Генераторный газ. Генераторный газ из крупного кускового топлива после охлаждения и очистки подается потребителю насыщенным водяным паром при 25—40° и содержит следы пыли, а газ из древесины и верхового торфа — также пары уксусной кислоты от 7 до 17 *Г/нм*³. Содержание смолы в нем 0 — 10 *Г/нм*³.

Генераторный газ из мелкозернистого топлива при газификации во взвешенном слое может быть подан потребителю с температурой 150—250°. Содержание пыли в таком газе 10—15 *Г/нм*³, смолы — 1 – 1,5 *Г/нм*³, уксусной кислоты (фрезерный торф) — следы, водяных паров (при влажности топлива 32—37%) 250 — 300 *Г/нм*³. При наличии скрубберной очистки газ содержит: пыли 0,5 1,0 *Г/нм*³, смолы — следы, водяных паров — 30 — 60 *Г/нм*³.

Газ воздушной продувки, являющийся отходом при процессе водяного газа, выходит из газогенератора с температурой 500—600° и содержит в себе 16—32 *Г/нм*³ пыли и 13 – 40 *Г/нм*³ водяных паров. Низшая теплота сгорания уноса 4200—6000 *ккал/кГ*.

Газ коксовых печей. Как правило, потребителю направляется газ, прошедший очистку от смолы, бензола, нафталина и аммиака („обратный газ"). Такой газ содержит смолы и пыли — следы, бензола — 4 *Г/нм*³. Влагосодержание газа отвечает его насыщению при 25—35° С.

Неочищенный газ содержит бензола 27—32 *Г/нм*³ и следы смолы, нафталина и аммиака.

Природные газы. Природный газ, подаваемый потребителю, пыли не содержит. Влагосодержание его зависит от начального (до 70 *ати* и выше) давления, редуцируемого на поверхности до 3—4 *ати*.

Ввиду того, что содержание примесей в газообразном топливе равно как и температура и давление, с которыми газ поступает потребителю, подвержены значительным колебаниям, эти величины должны быть специально уточнены для каждого конкретного случая проектирования (литературу см. стр. 175).

ГЛАВА VI

ВОДА

СОСТАВ ВОДЫ

Природная вода. Дождевая вода, наиболее свободная от примесей, всегда содержит растворенные газы O_2, CO_2, N_2, а также частицы пыли, сажи и т. п. Поверхностные воды содержат разнообразные примеси, состав которых зависит от почвенных и климатических условий, а также от времени года. Грунтовые воды отличаются постоянством состава, значительным солесодержанием и почти полным отсутствием взвешенных веществ.

Примеси, загрязняющие воду (табл. 1), могут находиться в растворенном и взвешенном состоянии. Растворенные вещества характеризуются молекулярной или ионной степенью раздробления. Величина коллоидно растворенных частиц равна 0,001—0,2 *мк*, взвешенных — от 0,2 *мк* (истинные суспензии) до частиц, видимых невооруженным глазом; растворенные в воде вещества делятся на электролиты (молекулы которых под воздействием молекул воды способны распадаться на ионы) и неэлектролиты (газы O_2, N_2 и др., а также некоторые органические вещества).

Показатели качества воды. К основным показателям качества воды относятся: прозрачность, сухой остаток, окисляемость и жесткость.

Прозрачность, характеризующая наличие в воде грубодисперсных взвешенных веществ, определяется высотой столба воды в *см*, через который возможно чтение шрифта определенной величины, либо высотой столба воды, через который виден черный крест стандартной величины, нанесенный на белом поле (ГОСТ 3351-46). Величиной, обратной прозрачности, является мутность, определяемая сравнением исследуемой воды со специально приготовленными эталонами.

Сухой остаток (общее количество растворенных в воде веществ за исключением летучих) определяется взвешиванием просушенного при 105—110° остатка после выпаривания профильтрованной пробы воды; выражается в *мГ/л*.

Окисляемость, характеризующая содержание органических веществ в профильтрованной воде выражается, в *мГ* кислорода или *мГ* перманганата калия ($KMnO_4$), необходимых для окисления органических веществ, содержащихся в 1 *л* воды.

Жесткость определяется содержанием в воде ионов накипеобразователей — солей щелочноземельных металлов Са и Mg. Различают жесткость карбонатную (временную) $H_к$ и некар-

Таблица 1

Классификация веществ, загрязняющих природные воды

Грубо дисперсные вещества (органические и минеральные)	Коллоиды		Молекулярно-дисперсные вещества		
	органические	минеральные	Катионы	Анионы	Газы
Плавающие	Гуминовые вещества	SiO_2	Ca^{+2} Mg^{+2} Na^{+} Fe^{+2} Al^{+3}	HCO_3^{-} CO_3^{-2} SO_4^{-2} Cl^{-} NO_3^{-} SiO_3^{-2}	CO_2 O_2 N_2 H_2S
Взвешенные	Масла Жиры				
Осаждающиеся	—				

бонатную (постоянную) H_p; сумма их дает общую жесткость H_o.

Карбонатная жесткость обусловливается наличием бикарбонатов Ca и Mg, которые при нагревании воды разлагаются.

Постоянная жесткость определяется содержанием в воде тех солей Ca и Mg, которые при нагревании не разлагаются.

До последнего времени в СССР за единицу измерения жесткости был принят немецкий градус жесткости (°H), соответствующий содержанию 10 *мГ* CaO в 1 *л* воды. ГОСТ 6055-51 введена новая единица — миллиграмм-эквивалент на литр (*мГэкв/л*) для измерения высоких жесткостей и микрограмм-эквивалент на литр (*мкГэкв/л*) для измерения малых жесткостей.

Соотношения между различными единицами измерения жесткости приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены значения молекулярного веса и содержания различных соединений, эквивалентные единицам жесткости.

Соотношение растворенных в воде веществ определяет реакцию воды, придавая ей кислый или щелочный характер. Критерием является концентрация водородных ионов H^+ в 1 *л* воды; он обозначается индексом pH:

$$pH = \lg \frac{1}{H^+}.$$

Химически чистая вода имеет pH = 7. Общепринята следующая шкала, характеризующая реакцию воды: pH < 5,5 — реакция воды сильно кислая; pH = 5,5 ÷ ÷ 6,5 — реакция слабокислая; pH = = 6,5 ÷ 7,5 — нейтральная; pH = 8 ÷ 10 — слабо щелочная; pH > 10 — сильно щелочная.

Ориентировочный состав вод различных рек Советского Союза приведен в табл. 4, а морей и океанов — в табл. 5.

Нормы качества воды. В питьевой воде (ГОСТ 2874-54), а также в воде для пищевых производств (пивоваренное, сахарное и т. д.) содержание остаточных веществ в *мГ/л* не должно превышать: активного хлора — 0,5, Pb — 0,1; As — 0,05; F — 1,5; Cu — 3; Zn — 15; Fe—0,3; общая жесткость — не более 7 *мГ/экв*; активная реакция pH — в пределах 6,5 — 9,5; прозрачность по шрифту в *см*, не менее 30.

Таблица 2

Таблица пересчета различных единиц измерения жесткости в миллиграмм-эквиваленты

Единицы измерения жесткости	Миллиграмм-эквивалент	Немецкий градус	Французский градус	Английский градус	Американский градус
Один миллиграмм-эквивалент в литре	1	2,804	5,005	3,511	50,045
Один немецкий градус	0,35663	1	1,7848	1,2521	17,847
Один французский градус	0,19982	0,5603	1	0,7015	10
Один английский градус	0,28483	0,7987	1,4255	1	14,255
Один американский градус	0,01998	0,0560	0,1	0,0702	1

Таблица 3

Содержания различных соединений, эквивалентные единицам жесткости

Химическая формула	Молекулярный вес	Эквивалент в *мГ/л*		Химическая формула	Молекулярный вес	Эквивалент в *мГ/л*	
		1 *мГэкв/л*	1° H			1 *мГэкв/л*	1° H
$Al_2(SO_4)_3$	342,12	57,02	20,34	$Mg(HCO_3)_2$	146,36	73,18	26,10
$CaCl_2$	111,00	55,50	19,90	MgO	40,32	20,16	7,19
$CaCO_3$	100,09	50,045	17,85	$Mg(OH)_2$	58,34	29,17	10,41
CaO	56,08	28,04	10,00	$MgSO_4$	120,38	60,19	21,50
$Ca(OH)_2$	74,10	37,05	13,21	NaCl	58,45	58,45	20,85
$CaSO_4$	136,14	68,07	24,28	Na_2CO_3	106,00	53,00	18,90
Cl_2	70,92	35,46	12,65	$NaHCO_3$	84,00	84,00	30,00
CO_2	44,00	22,00	7,85	NaOH	40,00	40,00	14,27
$FeSO_4$	151,92	75,96	27,09	SiO_2	76,06	38,03	13,60
$MgCl_2$	95,24	47,62	17,00	SO_2	80,06	40,03	14,28
$Mg(HCO_3)_2$	84,32	42,16	15,06	SO_4	96,06	48,03	17,13

Таблица 4

Анализы речных вод СССР (ориентировочные)

Река	Жесткость в *мГэкв/л*		Содержание в *мГ/л*					Окисляемость по кислороду	Сухой остаток
	общая	карбонатная (щелочность	Ca^{+2}	Mg^{+2}	SO_4^{-2}	Cl^-	SiO_3^{-2}		
Амур	1,43	1,03	28,4	0,2	—	4,6	12,5	21,2	134
Волга (Калинин)	4,96	3,46	61,0	23,2	30,5	6,6	13,8	17,3	244
Волга (Горький)	6,52	3,32	99,2	19,0	117,4	15,3	—	5,5	433
Днепр	5,14	4,25	74,3	17,3	34,6	16,5	16,7	5,7	345
Днестр	7,05	5,95	104,0	23,3	87,5	36,6	13,7	9,3	505
Дон	5,79	4,22	81,9	20,6	95,0	52,0	13,1	—	480
Енисей	5,61	3,57	85,7	16,2	8,0	5,0	—	—	297
Кривой Торец	13,6	9,35	158,0	64,0	414,0	244,0	39,2	8,7	1569
Кама	2,35	1,25	35,4	7,3	25,4	99,0	14,3	13,1	338
Москва	4,52	4,26	65,0	15,5	33,0	34,7	7,2	19,4	344
Нева	0,82	0,5	11,8	2,8	5,3	6,6	—	7,6	67
Обь	3,2	2,6	39,6	14,8	20,6	0,8	5,1	13,3	256
Ока	6,2	4,65	101,6	14,0	35,7	5,8	—	6,4	412
Печора	3,18	2,42	49,7	8,5	16,8	20,0	11,8	7,2	180
Северная Двина	6,35	4,72	102,0	15,3	76,8	7,1	10,2	9,0	390
Северный Донец	8,18	4,72	115,6	29,2	219,3	105,0	11,3	—	772
Томь	2,33	1,78	36,2	6,3	6,0	—	12,7	4,4	172
Урал	8,18	5,00	121,0	25,8	—	85,0	—	4,0	550

Таблица 5

Солевой состав морей и океанов (в %)

Соль	Океаны		Моря			
	Атлантический	Тихий	Средиземное	Черное	Азовское	Северное
NaCl	2,6395	2,588	2.510	1,402	0,9658	2,553
KCl	—	0,116	—	0,0189	0,0128	0,131
$MgCl_2$	0,3147	0,359	0,525	0,1304	0,0887	0,380
NaBr	—	0,040	—	—	—	0,037
$MgBr_2$	—	—	—	0,0005	0,0104	—
$CaSO_4$	0,13284	0,162	0,015	0,0105	0,8288	0,162
$MgSO_4$	0,1771	0,204	0,625	0,047	0,0764	0,177
$CaCO_3$	0,0056	—	—	—	—	—
$MgCO_3$	Следы	—	0,015	—	—	—
$Ca(HCO_3)_2$	—	—	—	1,0359	0,0022	—
$Mg(HCO_3)_2$	—	—	—	0,0209	0,0129	—
Итого:	3,2697	3,469	3,69	1,7661	1,188	3,44

Таблица 6

Нормы качества питательной воды для паровых котлов

	Барабанные котлы с естественной циркуляцией		Прямоточные котлы (без сепараторов)
	35 *ата*	110 *ата*	110 *ата*
Жесткость в *мкГэкв*	50	35	20
Кислород в *мГ/л*	0,05	Следы	Следы
Сухой остаток в *мГ/л*	—	—	3
Масло в *мГ/л*	2	0,5	Следы
Связанной CO_2 в *мГ/л*	35	10	—

Качество воды, идущей на питание паровых котлов, должно удовлетворять особым требованиям. Нормы качества питательной воды паровых котлов, принятые Министерством электростанций, приведены в табл. 6.

Для котлов старых конструкций, работающих на низком давлении, допустимо питание водой с жесткостью до 0,4 *мГэкв/л*, с содержанием кислорода до 1 *мГ/л* и масла до 10 *мГ/л*.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ

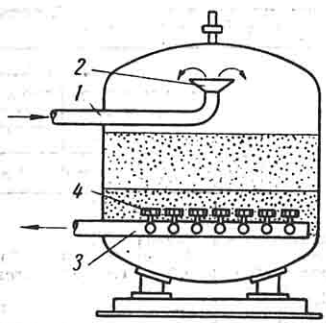
Фильтрация и осветление воды. Природная вода редко удовлетворяет требованиям потребителей. Поэтому вода предварительно подвергается очистке или обработке для улучшения ее качества.

Грубая фильтрация осуществляется процеживанием воды через неподвижные или движущиеся сита. Тонкая фильтрация производится в специальных сосудах — фильтрах, заполненных зернистым материалом: кварцевым песком, мраморной крошкой, антрацитом и др. По скорости фильтрации $V_ф$ различают: медленные фильтры, $V_ф = 0{,}2 \div 0{,}3$ *м/час*; скорые, $V_ф = 5 \div 10$ *м/час*; сверхскорые системы инж. Никифорова ($V_ф = 25 \div 50$ *м/час*).

По конструкции фильтры могут быть открытые (самотечные) и закрытые (напорные) и выполнены из металла, либо железобетона.

Загрязнение фильтра устраняется периодической промывкой засыпки путем пропуска воды снизу вверх с интенсивностью до 15 *л/м² сек*. Для улучшения качества промывки в ряде случаев применяется сжатый воздух для взрыхления засыпки.

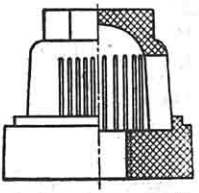
На фиг. 1 показана конструкция зернистого напорного фильтра, применяемого на водоочистительных установках. Подвод воды, подлежащей фильтрации, или отвод промывной воды производится через трубу *1* и воронку *2*.



Фиг. 1. Зернистый напорный фильтр.

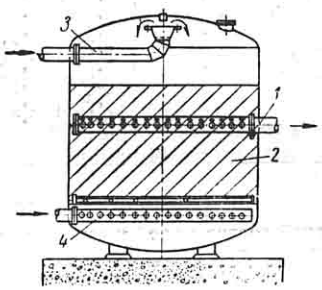
Отвод профильтрованной воды или подвод промывной производится через разветвленную дренажную систему *3*, снабженную дренажными колпачками *4*. Фильтр заполнен на высоту 0,5—0,7 *м* мелким кварцевым песком или другим зернистым материалом, ниже которого располагают поддерживающие слои гравия.

Применение специальных дренажных колпачков, фарфоровых или пластмассовых с отверстиями меньше 1 *мм* позволяет обходиться без гравийной подстилки. На фиг. 2 приведена конструкция одного из выпускаемых нашей промышленностью дренажных колпачков (ВТИ-5). Он изготовляется из фарфора. В нижней части этот колпачок имеет внутреннюю резьбу 1/2″ тр. для соединения с дренажными трубами. Верхняя часть имеет 24 щели, расширяющиеся внутрь, наружным размером 0,4 *мм* и высотой 20 *мм*.



Фиг. 2. Дренажный колпачок.

В открытых и напорных двухпоточных фильтрах (фиг. 3) дренажное устройство *1* размещается в толще зернистой загрузки *2*, а подлежащая осветлению вода



Фиг. 3. Двухпоточные фильтры.

подается одновременно двумя потоками сверху *3* и снизу *4*. Благодаря этому производительность таких фильтров оказывается вдвое больше, чем аналогичных однопоточных. Скорость фильтрования в напорных двухпоточных фильтрах принимается 8—12 *м/час*.

Количество фильтров выбирают по каталогу, исходя из потребной площади фильтрации

$$F_ф = k \frac{D}{V_ф} \ м^2,$$

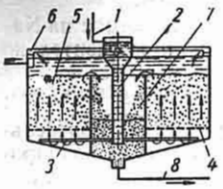
где $V_ф$ — скорость фильтрации в *м/час*, D — производительность водоочистки в *м³/час*; k — коэффициент запаса, учитывающий остановки фильтров на промывку и расход воды на собственные нужды; принимают $k = 1{,}1 \div 1{,}2$.

Осветление воды производится путем отстоя в отстойных бассейнах и отстойниках, а также в суспензионных осветлителях.

Отстойные бассейны выполняются обычно бетонными, с горизонтальным током воды со скоростью 15—20 *мм/сек*.

Вертикальные отстойники изготовляются металлическими или железобетонными. Скорость подъема воды в них принимается в пределах от 2 до 4 *м/час* в зависимости от температуры воды.

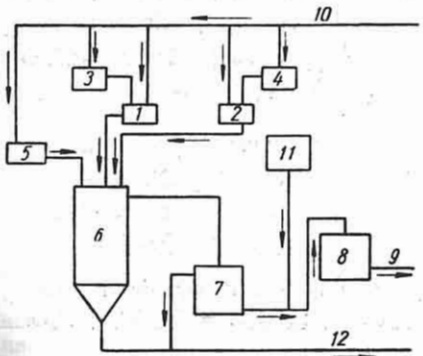
Метод суспензионного осветления заключается в фильтрации воды сквозь слой взвешенного шлама, что способствует более быстрому укрупнению взвесей и их выпадению. Скорость подъема воды в аппаратах этого типа —7—10 *м/час*, время пребывания 0,75—1,5 часа.



Фиг. 4. Суспензионный осветлитель.

На фиг. 4 приведена схема суспензионного осветлителя. Подлежащая осветлению вода подается трубопроводом *1* в воздухоотделитель *2*, откуда системой дырчатых труб *3* равномерно распределяется по площади осветлителя. Сквозь дырчатое дно *4* вода поднимается вверх и, пройдя зону взвешенного шлама *5*, удаляется через кольцевой желоб *6*. Избыток шлама попадает в шламоуплотнитель *7* и периодически удаляется через дренажный трубопровод *8*.

Коагуляция применяется для освобождения воды от органических и минеральных коллоидно-дисперсных веществ путем их укрупнения. Коагуляция



Фиг. 5. Коагуляционная установка с отстойником.

достигается присадкой к воде электролитов, нейтрализующих заряд коллоидов, в результате чего коллоиды приобретают способность слипаться и выпадать под действием силы тяжести.

На фиг. 5 показана схема коагуляционной установки с отстойником. Основная масса сырой воды поступает через трубопровод *10* и подогреватель *5* в отстойник *6*. Часть воды ответвляется к дозаторам коагулянта *1* и едкого натра *2*. Из отстойника вода через минеральный фильтр *7* и промежуточный бак *8* осветленной воды подается к потребителю по трубопроводу *9*. Для промывки фильтра служит бак *11*. Промывная вода спускается в дренажную линию *12*. Запас реагентов содержится в баках *3* и *4*.

Фиг. 6. Прямоточная коагуляционная установка.

На фиг. 6 показана прямоточная схема коагуляционной установки. Сырая вода насосом *6* подается к смесителю *1*, куда поступает также коагулянт из дозатора *3*. Количество ответвляемой воды определяется установленной на линии дроссельной шайбой *7*. Из смесителя вода через минеральный фильтр *2* подается в линию осветленной воды. Промывка фильтра производится из бака *5*. Запас реагентов содержится в баке *4*.

При расчетах рекомендуется принимать следующие дозировки безводного $Al_2(SO_4)_3$ в *мГ/л*: для северной полосы СССР — 60; для средней — 80; для южной — 100.

При коагуляции применяются следующие реагенты:

1) глинозем сернокислый технический, сорт В (ОСТ 18180-40), который содержит Al_2O_3 не менее 13,5%, H_2SO_4 свободной — не более 0,1%, нерастворимого в воде остатка — не более 1,0%;

2) купорос железный технический (ГОСТ 6981=54), который содержит $FeSO_4$ не менее 53,0%, нерастворимого остатка — не более 0,4%, свободной серной кислоты — не более 0,25%.

Химическое умягчение воды. Умягчение воды имеет целью удаление

из воды накипеобразователей (солей Ca и Mg). Применяются два метода умягчения — осаждение накипеобразователей и ионный обмен.

Метод осаждения основан на переводе растворенных в воде накипеобразователей в твердую фазу. Благодаря этому они выпадают из воды в виде шлама и могут быть удалены продувкой.

Умягчение воды по методу осаждения осуществляется в термических, термохимических и химических аппаратах.

В термических умягчителях, которые применяются для снижения карбонатной жесткости, производится подогрев воды свежим или отработавшим паром до 100° и выше. При этом бикарбонаты Ca и Mg разлагаются по схеме:

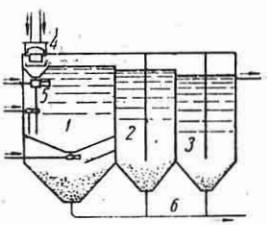
$$Ca(HCO_3)_2 = CaCO_3 + CO_2 + H_2O;$$

$$Mg(HCO_3)_2 = MgCO_3 + CO_2 + H_2O;$$

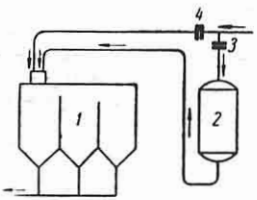
$$MgCO_3 + 2H_2O = Mg(OH)_2 + CO_2 + H_2O$$

На фиг. 7 приведена схема термоумягчителя малой производительности конструкции Всесоюзного научно-исследовательского института спиртовой промышленности.

Термоумягчитель представляет собой прямоугольный бак, разделенный перегородками на три основные части: реактор *1*, отстойник *2* и питательный бак *3*. В верхней части реактора расположена головка *4*, в которую подается подлежащая очистке вода и добавляются



Фиг. 7. Термоумягчитель.



Фиг. 8. Термокатионная установка.

реагенты. Пар для подогрева подается в помещенный в воде эжектор *5*, отсасывающий сырую воду и раствор реагентов из головки и подающий ее в полость реактора. Соли жесткости, выпадающие в виде шлама в реакторе и отстойнике, периодически удаляются в дренажную линию *6*.

Термохимические умягчители применяются для снижения как карбонатной, так и некарбонатной жесткости воды.

Уменьшение некарбонатной жесткости достигается путем присадки в термические умягчители различных реагентов.

В качестве реагентов в термохимических умягчителях применяются кальцинированная сода, едкий натр или вода, прошедшая Na-катионитовый фильтр и поэтому обогащенная щелочью. Схема термокатионитовой установки приведена на фиг. 8. Основная масса сырой воды подается к термоумягчителю *1*. Некоторая часть ответвляется на Na-катионитовый фильтр *2*, пройдя который также попадает в термоумягчитель.

Количество воды, ответвляемое на Na-катионитовый фильтр, приблизительно равно отношению $\frac{H_р}{H_0}$. В зависимости от последнего устанавливаются дроссельные шайбы *3* и *4* на основном водопроводе и ответвлении.

При химическом способе умягчения в качестве осадителей применяют гашеную известь $Ca(OH)_2$, кальцинированную соду Na_2CO_3, каустическую соду NaOH, фосфорнокислый натрий Na_3PO_4 и др. В зависимости от соотношения карбонатной и некарбонатной жесткости в воде могут применяться комбинации этих реагентов.

При известковом умягчении воды реакции протекают по схеме:

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 = 2CaCO_3 + 2H_2O;$$

$$Mg(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 + 2CaCO_3 + 2H_2O;$$

$$Fe(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 = Fe(OH)_2 + 2CaCO_3 + 2H_2O;$$

$$CO_2 + Ca(OH)_2 = CaCO_3 + H_2O.$$

При применении едкого натра:

$$Ca(HCO_3)_2 + 2NaOH = CaCO_3 + Na_2CO_3 + 2H_2O;$$

$$Mg(HCO_3)_2 + 4NaOH = Mg(OH)_2 + 2Na_2CO_3 + 2H_2O;$$

$$CO_2 + 2NaOH = Na_2CO_3 + H_2O.$$

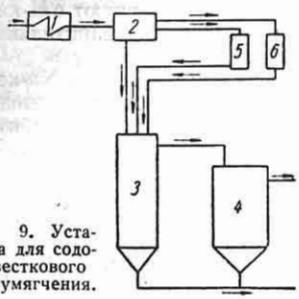
Получающаяся в результате этих реакций сода взаимодействует с солями некарбонатной жесткости:

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + Na_2SO_4;$$

$$CaCl_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + 2NaCl.$$

Аналогично протекают реакции при применении извести и кальцинированной соды.

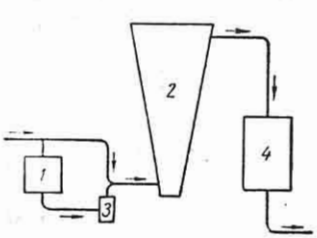
Схема установки для содо-известкового водоумягчения с реактором и отстойником и дозировкой извести в виде известкового молока показана на фиг. 9.



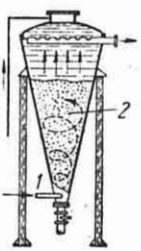
Фиг. 9. Установка для содо-известкового водоумягчения.

Сырая вода подается через подогреватель *1* к распределителю *2*, откуда основная масса воды направляется в реактор *3*, а часть — к дозаторам известкового молока *5* и соды *6*. Раствор реагентов из дозаторов также поступает в реактор, откуда вся масса воды переходит в отстойник *4*.

Другая схема известковой очистки показана на фиг. 10. Вода направляется в вихревой реактор *2*, куда насосом *3* подается известковый раствор из мешалки *1*. Из реактора вода для осветления поступает в зернистый фильтр *4*. Реактор (фиг. 11) представляет собой



Фиг. 10. Схема известковой очистки.



Фиг. 11. Реактор.

вертикальный конический бак с углом конусности 15—45°. Сырая вода и известковый раствор подаются в тангенциально расположенные сопла *1* в нижней части реактора, что обеспечивает хорошее перемешивание воды и реагента. В нижней части реактора находится слой зернистой засыпки *2*, представляющий собой развитую контактную поверхность.

Расход реагентов при содово-известковом способе очистки воды подсчитывают следующим образом.

а) Расход технической извести в $Г/т$

$$CaO = \frac{2800}{\mu} \times$$

$$\times (H_к + H_{Mg} + H_{CO_2} \pm K + 0{,}365),$$

где $H_к$, H_{Mg} — соответственно карбонатная и магнезиальная жесткость в *мГэкв/л*; H_{CO_2} — содержание в обрабатываемой воде CO_2 в *мГэкв/л*; K — приращение некарбонатной жесткости воды при коагуляции в *мГэкв/л*; μ — содержание активного вещества в техническом продукте в %.

При наличии предварительной коагуляции K берется со знаком минус, при коагуляции совместно с известкованием — со знаком плюс, при отсутствии коагуляции $K = 0$. При известковании с подогревом выше 80° $H_{CO_2} = 0$.

б) Расход технической кальцинированной соды, применяемой без едкого натра, в $Г/т$:

$$Na_2CO_3 = \frac{5300}{\mu} (H_p + K + 1),$$

где H_p — некарбонатная жесткость в *мГэкв/л*.

в) Расход технической кальцинированной соды при совместном применении ее с едким натром, в $Г/т$:

$$Na_2CO_3 = \frac{5300}{\mu} \times$$

$$\times (H_p + K + 1 - H_к - H_{Mg} - H_{CO_2}).$$

г) Расход технического едкого натра в $Г/т$:

$$NaOH = \frac{4300}{\mu} \times$$

$$\times (H_к + H_{Mg} + H_{CO_2} \pm K + 0{,}365).$$

Во время паводков, если $H_к < K + 0{,}365$ при бесщелочной обработке воды производится присадка едкого натра, расход которого в $Г/т$ для подщелачивания воды может быть определен по формуле:

$$NaOH = \frac{4300}{\mu} (K + 0{,}365 - H_к).$$

В табл. 7 приведено содержание составляющих едкого натра и кальцинированной соды, а в табл. 8 приведены основные данные об извести.

Таблица 7

Содержание составляющих каустической и кальцинированной соды в %

Составляющие	Едкий натр (по ГОСТ 2263-43)		Кальцинированная сода (по ГОСТ 5100-49)
	Сорт А	Сорт Б	
NaOH	Не менее 95	Не менее 92	—
Na_2CO_3	Не более 3,0	Не более 3,0	Не менее 95
NaCl	Не более 1,5	Не более 1,5	Не более 1

Таблица 8

Основные данные об извести по ГОСТ 1174-51

Параметры	Известь комовая			Негашеная кипелка	Известь пушонка
	Сорт				
	I	II	III	I	II
Активных CaO и MgO на сухую массу в % . . .	85	70	60	67	60
Выход известкового теста в *л/кГ*, не менее	2,4	2,0	1,6	—	—
Содержание непогасившихся зерен в %, не более	7	10	12	—	—

Умягчение воды при помощи ионного обмена. Водоумягчение путем ионного обмена заключается в фильтрации воды, содержащей катионы Ca и Mg, сквозь слой нерастворимого материала, способного обменивать катионы Ca и Mg на катионы натрия (Na-катионитовый фильтр) или водорода (H-катионитовый фильтр). В Na-катионитовом фильтре реакции обмена протекают по схеме:

$$\frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}}\Big|\,Cl_2^- + 2Na^+R^- \rightarrow \frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}}R_2^- + 2Na^+\Big|\,Cl^-;$$

$$\frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}}\Big|\,SO_4^{-2} + 2Na^+R^- \rightarrow \frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}}R_2^- + Na_2^+\Big|\,SO_4^{-2};$$

$$\frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}}\Big|\,(HCO_3)_2^- + 2Na^+R^- \rightarrow \frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}}R_2^- + 2Na^+\Big|\,HCO_3^-.$$

В этих формулах R^- — сложный комплекс поглотителя, играющий роль аниона.

Так как карбонатная жесткость превращается в эквивалентное количество щелочи, что в ряде случаев нежелательно (паровые котлы), Na-катионирование обычно комбинируют с H-катионированием или с предварительным известкованием.

Регенерация истощенного Na-катионита осуществляется раствором поваренной соли через специальную трубную систему, расположенную в верхней части фильтра, либо через водоподводящую воронку. Устройство дренажа катионитовых фильтров аналогично таковому механических фильтров. Высота слоя катионита — от 1 до 4 *м*.

Необходимая площадь фильтрации может быть определена по формуле

$$F = k\frac{DH(T+\tau)}{Eh}\ м^2,$$

где D — производительность водоочистки в $м^3/час$; H — жесткость воды в *мГэкв/л*; E — емкость поглощения в $Гэкв/м^3$ (табл. 9); h — высота слоя катионита в *м*; k — коэффициент $= 1{,}1 \div 1{,}2$, учитывающий расход воды на собственные нужды установки; T — длительность межрегенерационного периода в часах, принимаемая равной 6—10 час. для крупных и 8—24 час.

Таблица 9

Характеристика катионитовых материалов

Наименование	Объемный вес в $кГ/м^3$	Крупность зерна в *мм*	Обменная способность в *Гэкв* при фильтре	
			Na-катионитовом	H-катионитовом
Глауконит	1400	0,2—0,7	160	—
Сульфоуголь А I сорт	750	0,25—0,7	400	350
Сульфоуголь Б II сорт	750	0,25—0,7	285	250
Сульфоуголь А I сорт	600	0,5—1,1	320	285
Сульфоуголь Б II сорт . . .	600	0,5—1,1	250	215

для небольших установок; τ — длительность простоя фильтра на регенерации (1—2 часа).

По каталогу водоочистительного оборудования, исходя из найденной площади фильтрации, подбирают соответствующие фильтры. При этом следует проверить скорость фильтрации, которая должна быть при нормальной работе $V_\phi = 7 \div 15$ *м/час* и при выключении одного из фильтров на регенерацию $V_\phi \leqslant 20$ *м/час*.

Расход технической поваренной соли в *кГ/т* на регенерацию фильтра равен

$$NaCl = \frac{22{,}5}{\mu} H_0.$$

При Н-катионировании реакции обмена происходят по схеме:

$$\frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}} \Big| (HCO_3)_2^- + 2H^+R^- \rightarrow \frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}} R_2^- + 2H_2O + 2CO_2;$$

$$\frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}} \Big| \frac{SO_4^{-2}}{Cl_2^-} + 2H^+R^- \rightarrow \frac{Ca^{+2}}{Mg^{+2}} R_2^- + \frac{H_2^+/SO_4^{-2}}{2H^+/Cl^-};$$

$$Na_2^+ \Big| \frac{SO_4^{-2}}{Cl_2^-} + 2H^+R^- \rightarrow 2Na^+R^- + \frac{H_2^+/SO_4^{-2}}{2H^+/Cl^-}.$$

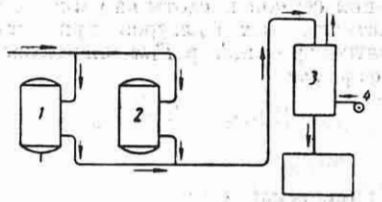
Регенерация Н-катионита производится раствором серной кислоты. Конструкция Н-катионитового фильтра отличается от Na-катионитового тем, что дренажи и арматура, соприкасающиеся с кислотой или кислой водой, выполняются из кислотоупорных материалов, а внутренняя поверхность фильтра покрывается кислотоупорной краской.

В результате Н-катионирования происходит глубокое умягчение и известная деминерализация воды, однако при этом вода обогащается минеральными кислотами.

Нейтрализация кислот Н-катионированной воды, как и щелочи Na-катионированной, достигается комбинацией обоих способов водоумягчения. Применяются три схемы совместного Н — Na-катионирования.

Параллельное фильтрование (фиг. 12) заключается в пропуске части воды через Na-катионитовый фильтр *1* и части — через Н-катионитовый фильтр *2* и последующем их смешении.

Образующуюся в результате реакции нейтрализации углекислоту удаляют в дегазере *3* путем продувки воды воздухом, подаваемым вентилятором *4*. Эту схему рекомендуется применять, когда $\frac{H_к}{H_0} \geqslant 0{,}5$, $H_р$ — больше 3,5 *мГэкв/л*, допустимая щелочность очищенной воды — 0,2—0,35 *мГэкв/л* и суммарное содер-



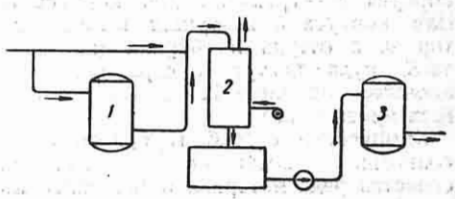
Фиг 12. Параллельное фильтрование.

жание $SO_4^{-2} + Cl^-$ — меньше 5,5—7,5 *мГэкв/л*.

Последовательное Н—Na-катионирование (фиг. 13) осуществляется пропуском части воды через Н-катионитовый фильтр *1*, смешением ее с остальной массой сырой воды и пропуском всей воды через дегазер *2* и Na-катионитовый фильтр *3*.

Эту схему рекомендуется применять, когда $\frac{H_к}{H_0} \leqslant 0{,}5$, $H_р$ — не меньше 3,5 *мГэкв/л*, допустимая щелочность — 0,7—1 *мГэкв/л* и суммарное содержание $SO_4^{-2} + Cl$ — больше 5,5—7,5 *мГэкв/л*.

Совместное Н—Na-катионирование состоит в пропуске воды через фильтр,



Фиг. 13. Последовательное Н—Na-катионирование.

материал которого регенерируется последовательно раствором кислоты и поваренной соли.

Рекомендуется применять при допустимой щелочности очищенной воды больше 1,5—1,8 *мГэкв/л* и суммарном содержании $SO_4^{-2} + Cl^-$ менее 3,6—5,5 *мГэкв/л*.

На электростанциях высокого давления

применяется нейтрализация Н-катионированной воды при помощи едкого кали.

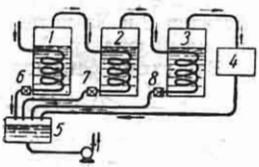
В табл. 9 приведены характеристики катионитовых материалов. Расход $n^0/_0$-ной серной кислоты на регенерацию Н-катионитовых фильтров при чистом Н-катионировании в *Г/т* определяется по формуле

$$H_2SO_4 = \frac{7000}{n} H_0.$$

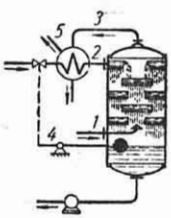
Применяемая серная кислота техническая (ГОСТ 2184-43) содержит от 65 до 92,5% моногидрата.

Обессоливание воды производится путем испарения воды с последующей конденсацией пара. Испарители обычно устраиваются многоступенчатыми (фиг. 14).

Сырая вода подается параллельно во все три корпуса испарителя. Свежий пар поступает в змеевик корпуса *1*



Фиг. 14. Испаритель.



Фиг. 15. Деаэратор

Вторичный пар корпуса *1* испарителя является греющим для корпуса *2*, пар корпуса *2* — греющим для корпуса *3*. Пар корпуса *3* поступает в конденсатор *4*, а оттуда в сборник конденсата *5*, куда поступает через конденсационные горшки *6*, *7*, *8* и конденсат из всех змеевиков.

Химический способ глубокого обессоливания основан на использовании свойства ряда материалов (анионитовых смол) адсорбировать из воды растворенные в ней минеральные кислоты. Химически обессоленная вода имеет остаточную жесткость порядка 10—36 *мГэкв/л*, щелочность от 0,05 до 0,3 и остаточное солесодержание от 8 до 25 *мГ/л* (главным образом за счет кремнекислоты).

По конструкции анионитовый фильтр не отличается от Н-катионитового. Он включается в схему последовательно после Н-катионитового фильтра.

Регенерация анионитовых фильтров производится бикарбонатом, расход которого в *Г/т* при этом равен

$$NaHCO_3 = \frac{12000}{\mu}\left|\frac{SO_4^{-2} + 0{,}845K_{Al}}{48} + \frac{Cl^-}{35{,}46}\right|,$$

где SO_4^{-2} и Cl^- — содержание их в *мГ/л*; K_{Al} — дозировка коагулянта в *мГ/л*.

Бикарбонат (ГОСТ 2156-52) содержит: $NaHCO_3$ не менее 98,5%, Na_2CO_3 не более 1,2%, NaCl не более 0,05%.

Деаэрация (дегазация) воды применяется для освобождения воды от растворенных в ней газов O_2 и CO_2.

Термическая деаэрация использует свойство уменьшения растворимости газов при повышении температуры и уменьшении давления. Работающие по принципу термической деаэрации аппараты могут быть вакуумными (низкое давление) и работающими под давлением (высокая температура). При химической деаэрации используются различные вещества, способные жадно соединяться с кислородом (гидрат закиси железа, сульфит и др.). Расход технического сульфита натрия ($Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$) составляет практически 20 *Г* на 1 *Г* кислорода.

Применяемый сульфит натрия (ГОСТ 903-41) содержит $Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$ не менее 88%, $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ — не более 4%, FeO — не более 0,1%, нерастворимого остатка — не более 0,1%.

На фиг. 15 изображена схема деаэратора смешивающего типа, работающего под давлением 1,05—1,5 *ата*. Пар по трубе *1* подается внутрь деаэрационной головки аппарата и, двигаясь вверх, интенсивно перемешивается с ниспадающим, разбитым на мелкие струйки потоком воды. Пар при этом конденсируется, а освобожденные газы через трубку *3*, конденсатор-охладитель *2* и трубку *5* выходят наружу. Уровень воды поддерживается регулятором *4*.

Способ обескислороживания воды без ее подогрева разработан ВТИ (Всесоюзным Теплотехническим институтом им. Ф. Э. Дзержинского); он основан на перемешивании подлежащей обескислороживанию воды с газом, лишенным кислорода.

Подлежащая обескислороживанию вода под давлением 3—4 *ати* направляется в газоводяной эжектор, в котором за счет интенсивного перемешивания воды

и лишенного кислорода газа происходит обескислороживание воды. Процесс продолжается на всем пути движения газоводяной смеси и завершается в десорбере, из которого вода направляется в питательный бак, а обогащенный кислородом газ — в реактор, представляющий собой герметически закрытую печь, заполненную древесным углем или железной стружкой.

В реакторе поддерживается температура 850—900°, при которой происходит связывание выделенного водой кислорода.

Обескислороженный газ снова попадает в эжектор.

Очистка воды от масла производится в песочных фильтрах или методом коагуляции при помощи гидрата окиси алюминия.

Для очистки конденсата от масла ВТИ разработана схема последовательного пропуска конденсата через два фильтра. Первый из них загружается коксом с величиной зерен 1—1,5 *мм* (фильтрующий слой высотой 600 *мм*) и 1,5—10 *мм* (подстилочные слои общей высотой 300 *мм*) и служит для отфильтровывания крупных частиц масла. Второй загружается активированным углем марки КАД с величиной зерен 0,3—1,5 *мм* (фильтрующий слой высотой 1000 *мм*) и кварцем с величиной зерен 1,5—2,0 *мм* (подстилочные слои общей высотой 400 *мм*) и служит для адсорбирования растворенного и не задержанного первым фильтром масла.

При фильтрации конденсат пропускается в фильтрах сверху вниз со скоростью 4—5 *м/час* в коксовом и 7—7,5 *м/час* — в угольном фильтрах. Промывка загрузки производится обратным током в течение 30 мин. горячей (50—60°) воды со скоростями: в коксовом фильтре — 15—20 *м/час* и угольном — 10—12 *м/час*.

Таблица 10

Удельный вес водных растворов различных реагентов при 15° С

Процентное содержание	Водный раствор							
	NaCl	$FeSO_4 7H_2O$	Na_2SO_3	NaOH	Na_2CO_3	$Al_2(SO_4)_3$	CaO	H_2SO_4
1	1,007	—	1,008	1,011	1,011	1,017	1,010	1,005
5	1,036	1,027	1,046	1,056	1,053	1,057	1,041	1,033
10	1,073	1,054	1,095	1,115	1,106	1,107	1,087	1,069
15	1,111	1,082	1,125	1,170	—	1,157	1,134	1,105
20	1,151	1,112	—	1,225	—	1,207	1,185	1,143
25	1,192	1,143	—	1,275	—	1,257	—	1,182
30	—	1,174	—	1,332	—	—	—	1,220

В табл. 10 приведены значения удельного веса водных растворов различных реагентов, применяемых при очистке воды.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Гордон И. Л., Водоприготовление в теплосиловом хозяйстве, Энергоиздат, 1940.

2. Зайцев Д. В., Опреснение воды, Стройиздат, 1948.

3. Кострикин Ю. М., Прохоров Ф. Б. и Гурвич С. М., Пермутитовый способ очистки воды, ГОНТИ, 1939.

4. Справочник по проектированию электростанций, Теплопроект МЭС, 1948.

5. Турчинович В. Т., Улучшение качества воды, Стройиздат, 1940.

6. Шкроб М. С., Современные методы водоподготовки и обработки котловой воды, Госэнергоиздат 1947.

7. Гурвич С. М., Улучшение работы механических фильтров на электростанциях, „Электрические станции" № 3, 1953, стр. 18—21.

8. Морозов С. Г. и Прохоров Ф. Г., Дренажные щелевые колпачки ВТИ-К и ВТИ-5. „Электрические станции" № 6, 1952, стр. 23—24.

9. Акользин П. А. и Глушко В. В., Обескислороживание воды без подогрева, „Известия ВТИ" № 5, 1952, стр. 26—28.

ГЛАВА VII

СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ВВЕДЕНИЕ

Смазкой создается промежуточная жидкая или пластическая прослойка для замены сухого трения скольжения трущихся пар внутренним жидкостным трением самой смазочной прослойки.

Лучшей с механической стороны будет та смазка, которая при наименьшем своем внутреннем трении обеспечивает наименьшее общее трение и достаточную толщину смазочной прослойки, т. е. стремится сохранить жидкостное трение.

Лучшей с физико-механической стороны смазкой является та, которая обладает наибольшей способностью проникать в узкий зазор между трущимися поверхностями, наивысшим расклинивающим действием, наибольшим сопротивлением выдавливанию из зазоров.

Смазка должна быть физически и химически стабильной.

Смазочные материалы разделяются на две группы:

1) жидкие смазочные масла и
2) мази или консистентные смазки.

ЖИДКИЕ СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА

В табл. 1—4 приведены физико-химические свойства жидких смазочных масел.

Примеры применения жидких смазочных масел

1. **Масло общего назначения** (табл. 1). Масла для высокоскоростных механизмов: Л (велосит); Т (вазелиновое) и соляровое. Масла Л и Т — сернокислотной очистки, а соляровое — щелочной, применяются для смазывания механизмов, работающих с большими скоростями и малой нагрузкой, а также для технологических целей. Соляровое может применяться, кроме того, в качестве охлаждающей жидкости, при обработке металлов.

Масла индустриальные (веретенные и машинные); *а*—индустриальное 12 (веретенное 2); *б* — индустриальное 20 (веретенное 3); *в* — индустриальное 30 (машинное Л); *г* — индустриальное 45 (машинное С); *д* — индустриальное 50 (машинное СУ). Масла — сернокислотной очистки, применяются для смазывания оборудования и двигателей, а также в гидравлических системах и для технологических целей.

Масла индустриальные нещелочные *а* — 20В (веретенное 3В); *б* — 45В (машинное СВ). Масла — щелочной очистки, применяются для смазывания оборудования при подаче масла проточной системой, а также для технологических целей. Костное смазочное — для смазки механизмов.

Полугудрон применяется для смазывания грубых механизмов, осей повозок и вагонеток с открытыми подшипниками.

2. Масла для двигателей внутреннего сгорания (табл. 2). «Автомобильные с присадкой по ГОСТ 5303-50 марок: АСп-5 — с присадкой АС-5; АКп-5 — с присадкой автол «6» по ГОСТ 1862-51; АСп-9,5 — с присадкой АС-9,5; АКп-9,5 — с присадкой автол «10» по ГОСТ 1862-51. Масла селективной и сернокислотной очистки, содержащие 3% присадки ЦИАТИМ-331, применяются для смазки карбюраторных двигателей автомобилей.

«Автомобильные специальные» — летнее и зимнее, содержащие 3% присадки НАКС, применяются для смазки карбюраторных автомобильных двигателей ЗИС-110.

«Автотракторные сернокислотной очистки» применяются для смазки карбюраторных двигателей автомобилей и тракторов.

Автотракторные масла сернокислотной очистки изготовляются следующих марок:

а) АК-6 (автол 6), АК-10 (автол 10) и АК-15 (автол 18) с добавкой не более 0,5% депрессатора АзНИИ;

б) АКЗп и АКЗп-10, загущенные полиизобутиленом с молекулярным весом 15000—25000 с присадкой ЦИАТИМ-331 или АзНИИ-4 и с добавкой не более 0,3% депрессатора АзНИИ.

Масло АК-6 вырабатывается только для производства автомобильного масла АКп-5 (см. ГОСТ 5303-50).

«Моторное» марки МК-8 (по ГОСТ 6457-53). «Дизельное с присадкой» — для смазки быстроходных дизельных двигателей — зимнее и летнее. «Для тихоходных дизелей» — для смазки цилиндров и прочих деталей двигателей внутреннего сгорания (нефтяных, газовых) с числом оборотов менее 600 в минуту. Масло изготовляется марки Т.

3. Масла целевого назначения (табл. 3). «Приборное» (МВП) — сернокислотной очистки, применяется для смазывания контрольно-измерительных приборов, работающих при низких температурах, и для наполнения масляно-пневматических амортизаторов.

«Сепараторные» — легкое «Л» и тяжелое «Т», применяются для смазки подшипников центрифуг и сепараторов облегченного типа.

«Для прессов» — применяется в системах смазки прессов.

«Для механизмов опрокидывания вагонов-самосвалов».

«Для холодильных машин»—сернокислотной очистки, применяется для смазки компрессоров холодильных машин. Масло изготовляется марок ХА и ХФ12.

«Турбинные» марок: 22п (турбинное Л с присадкой ВТИ-1); 22 (турбинное Л); 30 (турбинное УТ); 46 (турбинное Т); 57 (турборедукторное)—кислотноземельной очистки, применяются для смазывания подшипников и вспомогательных частей паровых и водяных турбин.

«Компрессорные» марок 12 «М» и 19 «Т». Масло «М» предназначается для смазки одноступенчатых компрессоров низкого давления и двухступенчатых среднего давления, а «Т» — для многоступенчатых высокого давления.

«Трансмиссионное автомобильное летнее» предназначается для смазывания зубчатых зацеплений коробки подач, картера заднего моста и рулевого управления грузового автомобиля летом.

«Трансмиссионное автотракторное» зимнее и летнее применяются для смазывания зубчатых зацеплений коробки передач, картера заднего моста и других аналогичных механизмов наземных машин с механической тягой.

«Для коробки передач и рулевого управления», применяются для коробки передач и рулевого управления автомобилей ЗИС-110.

«Для гипоидных передач»—для гипоидных передач автомобилей ЗИС-110.

«Масла осевые» марок «Л» (летнее), «З» (зимнее) и «С» (северное) применяются для смазки шеек осей колесных пар подвижного состава железных дорог.

«Веретенное АУ» — высокоочищенное масло, предназначается для специальных целей.

«Швейное» масло сернокислотной очистки применяется для смазки швейных, вязальных и вышивальных машин.

«Судовое» — для смазки деталей судовых механизмов.

«Для прокатных станов».

4. Масла для паровых машин (табл. 4). «Цилиндровые легкие» изготовляются двух марок: «11» (цилиндровое 2) и «24» («Вискозин»); применяются для смазывания паровых машин, работающих на насыщенном паре, и механизмов, работающих с большими нагрузками и малыми скоростями.

«Цилиндровые тяжелые» изготовляются двух марок: цилиндровое «38» (цилиндровое 6) и цилиндровое «52» (Вапор); применяются для смазывания паровых машин, работающих на перегретом паре, и механизмов, работающих с большими нагрузками и малыми скоростями.

Физико-химические свойства

Показатели физико-химических свойств	„Л" (велосит)	„Т" (вазелиновое)	Соляровое	Индуст „12" (веретенное 2)	Индуст „20" (веретенное 3)
Удельный вес d_4^{20} . . .	0,865—0,885	0,860—0,880	—	0,876—0,891	0,881—0,901
Вязкость при 50° С:					
а) кинематическая в *сст*, в пределах * . .	4,0—5,1	5,1—8,5	5,0—9,0	10,0—14,0	17,0—23,0
б) соответствующая ей условная в градусах, в пределах	1,29—1,40	1,40—1,72	1,39—1,76	1,86—2,26	2,60—3,31
Кислотное число в *мг* КОН на 1 *г* масла не более	0,04	0,04	—	0,14	0,14
Зольность в %, не более	0,005	0,005	0,025	0,007	0,007
Водорастворимые кислоты и щелочи	Отсутствие				
Механические примеси в %, не более	Отсутствие				
Вода в %, не более . . .	Отсутствие		Следы	Отсутствие	
Температура вспышки (определяемая в закрытом тигле) в °С, не ниже	112	125	125 **	165 **	170 **
Температура застывания в °С, не выше	—25	—20	—20	—30	—20
Коксуемость в %, не более	—	—	—	—	—
Сера в %, не более . .	—	—	0,2	—	—
Технические условия по ГОСТ	1840-51		1666-51		

* Сантистокс = 0,01 *см²/сек*.
** В открытом тигле.
*** Определяемая в приборе Бренкена.

Таблица 1

масел общего назначения

риальные					Костное смазочное		Полугудрон
„30" (машинное „Л")	„45" (машинное „С")	„50" (машинное „СУ")	„20В" (веретенное „3В")	„45В" (машинное „СВ")	сорт высший	сорт первый	
0,886—0,916	0,886—0,926	—	—	—	0,915—0,919		
27,0—33,0	38,0—52,0	42,0—58,0	17,0—23,0	38,0—52,0	—	—	
3,81—4,59	5,24—7,07	5,76—7,86	2,60—3,31	5,24—7,07	При 20° С 11—13	11—13	18,0—25,0
0,2	0,35	0,15	0,14	0,35	0,2	1,0	—
0,007	0,007	0,005	—	—	—	—	—
Отсутствие					—	—	Отсутствие
0,007	0,007	0,007	Отсутствие	0,007	Не допускаются		0,1
Отсутствие			Следы		0,05	0,05	0,5
180 **	190 **	200 **	170 **	180 **	300 ***	293 ***	140 ***
—15	—10	—20	—15	—8	—18	—2	—
0,3	0,3	0,2	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
1707—51			2854-51		4593-49		4105-48

Физико-химические свойства масел, предназна

Показатели физико-химических свойств	Автомобильные с присадкой				Автомобильные специальные	
	АСп-5	АКп-5	АСп-9,5	АКп-9,5	летнее	зимнее
Удельный вес d_4^{20} не выше	—	—	—	—	—	—
Вязкость при 50° С:						
а) кинематическая в *сст*, в пределах	—	—	—	—	45—60	29—33
б) соответствующая ей условная в градусах, в пределах	—	—	—	—	6,0—8,0	4,0—4,5
Вязкость кинематическая при 100° С в *сст*, не менее	5	5	9,5	9,5	—	—
Отношение кинематической вязкости при 50° С к кинематической при 100° С, не более	7	8,6	7,4	8,8	—	—
Кислотное число в *мГ* КОН на 1 *Г* масла, не более	3,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0
с присадкой ЦИАТИМ-331 — не более	—	—	—	—	—	—
Зольность в %, не более	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2
Содержание фурфурола	Отсутствие				—	—
Водорастворимые кислоты и щелочи	Отсутствие					
Механические примеси в %, не более	0,025	0,025	0,025	0,025	0,0085	0,0085
Вода в %, не более	Следы				Отсутствие	
Температура вспышки (определяемая в открытом тигле) в °С, не ниже	170	185	200	200	200	165
Температура застывания в °С, не выше	—30	—30	—20	—20	—20	—25
Термокислотная стабильность по методу Папок при 250° С в минутах, не менее	30	27	30	27	30	30
Коксуемость в %, не более	—	—	—	—	0,8	0,8
Испытание на коррозию (по Пинкевичу) на пластинке из безоловянистой бронзы марки Бр. С30 по ГОСТ 493-41 в *Г/м²*, не более	—	—	—	—	5	5
Температурный коэффициент вязкости ($ТКВ_{0-100}$), не более	—	—	—	—	—	—
Цвет в *мм*, не менее	—	—	—	—	—	—
Технические условия по ГОСТ	5303-50				3829-51	

* С присадкой ЦИАТИМ-331 в % не менее 0,4, а с присадкой $А_3$ НИИ-4 не менее 0,04.
** При наличии присадки в % не более 0,01; не допускается песок и др. абразивные вещества.
*** Определяемая в приборе Бренкена.

Таблица 2

чаемых для двигателей внутреннего сгорания

Автотракторные сернокислотной очистки				Моторное	Дизельное			Для тихоходных дизелей (моторное)
АКЗп-6	АКЗп-10	АК-10 (автол 10)	АК-15 (автол 18)	МК-8	Дп-8	Д-11	Дп-11	Т
—	—	0,920	0,926	—	—	—	—	0,921
При 0° С 550	При 0° С 1100	—	—	8,3	—	—	—	62—68
—	—	—	—	—	—	—	—	8,2—9,0
6	10	10	15	—	8—9	10,5—12,5	10,5—12,5	—
4,2	4,5	7,0	9,0	—	6	7,3	6,5	—
0,10	0,10	0,25	0,35	0,04	—	0,15	—	—
2,8	2,8	—	—	—	0,10	—	0,10	—
0,01*	0,01*	0,02	0,025	0,005	0,005	0,005	0,005	0,04
—	—	—	—	Отсутствие	—	—	—	—
				Отсутствие				
**	**			Отсутствие				0,007
		Следы			Следы	Отсут.	Следы	Отсутствие
170	170	200	215	135	200	200	190	205***
—40	—40	—25	—5	—55	—25	—18	—15	0
—	—	20	—	—	20	—	20	—
0,15	0,15	0,40	0,70	—	0,2	0,4	0,4	0,4
—	—	—	—	—	13	—	13	—
22	25	—	—	—	—	—	—	—
6	6	3,5	—	—	—	—	—	4,0
1862—51				6457—53	5304-54	5304-54		1519-42

Физико-химические свойства

Показатели физико-химических свойств	Приборное (МВП)	Сепараторное		Для прессов	Для механизмов опрокидывания вагонов-самосвалов
		„Л"	„Т"		
Вязкость при 50° С:					
а) кинематическая в *сст*, в пределах	6,3—8,5	6,10—10,0	14,0—17,0	—	18,5—20,5
б) соответствующая ей условная в градусах, в пределах	1,51—1,72	1,48—1,86	2,26—2,6	—	2,78—3,0
Вязкость при 100° С:					
а) кинематическая в *сст*, не менее	—	—	—	10,0	—
б) соответствующая ей условная в градусах, не менее	—	—	—	1,86	—
Кислотное число в *мГ* КОН на 1 *Г* масла, не более	0,14	0,35	0,35	—	—
после окисления — не более	—	—	—	—	—
Осадок после окисления в % не более	—	—	—	—	—
Зольность в %, не более	0,005	—	—	—	—
Коксуемость в %, не более	—	—	—	—	—
Водорастворимые кислоты и щелочи	Отсутствие				
Механические примеси в %, не более	Отсутствие				
Вода в %, не более	Отсутствие				
Температура вспышки (определяемая в открытом тигле) в °С, не ниже	—	135	165	200	135
Температура вспышки (определяемая в закрытом тигле) в °С, не ниже	120	—	—	—	—
Температура застывания в °С, не выше	—60	+5	+5	—15	—
Цвет со стеклом S и W в *мл*, не менее	—	20 **	20 **	—	—
Температура помутнения смеси масла с фреоном в 0° С не выше	—	—	—	—	—
Содержание серы в %	—	—	—	—	—
Стабильность к окислению по Сляю (число Сляя), не более	—	—	—	—	—
Содержание нитробензола	—	—	—	—	—
Натровая проба с подкислением в баллах, не более	—	—	—	—	—
Испытание на коррозию на пластинках стальных марок 40 или 50 и из меди М-2	—	—	—	—	—
Скорость деэмульсации в мин., не более	—	—	—	—	—
Содержание присадки ВТИ-1 в % не более	—	—	—	—	—
Технические условия по ГОСТ	1805-51	176-50		5519-50	5660-51

* Песок и другие абразивные вещества в числе механических примесей не допускаются.
** С применением стекла StW + PW.
*** Содержание присадки в %: 0,009—0,015.
**** Со стеклом № 2.

масел целевого назначения

Таблица 3

Для холодильных машин		Турбинное				Турбинное 57 (турборедукторное)	Компрессорное		Трансмиссионное автомобильное
ХА	ХФ12	22п (турбинное Л с присадкой ВТИ-1) ***	22 (турбинное Л)	30 (турбинное УТ)	46 (турбинное Т)		12 „М"	19 „Т"	
11,5—14,5	18	20—23	20—23	28—32	44—48	55—59	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	11—14	17—21	20,5—32,4
—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,0—4,5
0,14	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,15	0,10	—
—	0,05	0,20	0,35	0,35	0,45	—	—	—	—
—	0,005	0,05	0,10	0,11	0,15	—	0,015	0,010	—
0,012	—	0,005	0,005	0,005	0,020	0,040	0,03	0,02	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				Отсутствие		Отсутствие	0,007	0,007	0,15*
		—	—	—	—	—	Отсутствие		0,05
160	160	180	180	180	195	195	—	—	165
—	—	—	—	—	—	—	216	242	—
—40	—40	—15	—15	—10	—10	—	—	—	—20
—	25 ****	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—28	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	20	20	Отсутствие
—	—	2	2	2	2	2	—	—	—
Выдерживает		—	—	—	—	—	60	5	—
—	—	8	8	8	8	8	—	—	—
—	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—
5546-54		32-53					1861—54		3781-53

Показатели физико-химических свойств	Трансмиссионное автотракторное		Для коробки передач и рулевого управления	Для гипоидных передач
	Зимнее	Летнее		
Вязкость при 50° С:				
а) кинематическая в *сст*, в пределах	—	—	—	—
б) соответствующая ей условная в градусах, в пределах	—	—	—	—
Вязкость при 100° С:				
а) кинематическая в *сст*, не менее	—	—	20,5—32,4	20,5—32,4
б) соответствующая ей условная в градусах, не менее	2,7—3,2	4,0—4,5	3,0—4,5	3,0—4,5
Кислотное число в *мГ* КОН на 1 *Г* масла не более	—	—	—	—
Зольность в %, не более	—	—	—	—
Коксуемость в %, не более	—	—	—	—
Водорастворимые кислоты и щелочи	—	—	Отсутствие	
Механические примеси в %, не более	0,05 *	0,05 *	0,10	0,10
Вода в %, не более	Следы		Отсутствие	
Температура вспышки (определяемая в открытом тигле) в °С, не ниже	170	180	—	—
Температура вспышки (определяемая в закрытом тигле) в °С, не ниже	—	—	—	—
Температура застывания в °С, не выше	—20	—5	—20	—20
Содержание серы в %	—	—	1,2	1,5
Стабильность к окислению по Сляю (число Сляя), не более	—	—	—	—
Содержание нитробензола	—	—	Отсутствие	
Испытание на коррозию на пластинках стальных марок 40 или 50 и из меди М-2	Выдерживает		Выдерживает на стальных пластинках; на медных дает потемнение	
Содержание продутого растительного масла в %, не менее	—	—	—	—
Технические условия по ГОСТ	542-50		4002-53	4003-53

* Песок и другие абразивные вещества в числе механических примесей не допускаются.

** Удельный вес d_4^{20} в пределах 0,888—0,896.

*** Вязкость при 20° С: а) кинематическая в *сст* не более 49,0; б) соответствующая ей условная

Продолжение табл. 3

Осевое			Веретенное „АУ" **	Швейное	Судовое	Для прокатных станов (П-28)
„Л"	„З"	„С"				
36—52	20—25	12—14	12,0—14,0	6,0—10,0	75—90	—
5—7	3,0—3,5	2,0—2,2	2,05—2,26 ***	1,48—1,86	10,1—12,2	—
Вязкость динамическая в пуазах не более:						
а) при 0° С		2				
б) при —35° С		120	—	—	—	26—30
в) при —50° С		2500				
			—	—	—	3,68—4,20
—	—	—	0,07	0,1	—	0,1
—	—	—	0,005	0,01	—	—
—	—	—	—	—	—	1,0
			Отсутствие			
0,07	0,05	0,01	Отсутствие		0,007	Отсутствие
0,4	0,3	0,1		Отсутствие		
—	—	—	163	—	210	285
135	130	125	—	135	—	—
—15	—40	—55	—45	—	0	—10
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	Выдерживает на пластинку из стали	—	—	Выдерживает на стальных пластинках при 100° С в течение 3 час.
—	—	—	—	—	20	—
	610-48		1642-50	973-50	2022-51	6480-53

в градусах не более 6,68.

Таблица 4

Физико-химические свойства масел для паровых машин

Показатели физико-химических свойств	Цилиндровое легкое		Цилиндровое тяжелое	
	„11" (цилиндровое „2")	„24" („Вискозин")	„38" (цилиндровое „6")	„52" (Вапор)
Вязкость при 100 °С:				
а) кинематическая в *сст*, в пределах	9—13	20—28	32—44	44—59
б) соответствующая ей условная в градусах, в пределах	1,76—2,15	2,95—3,95	4,5—6,0	6,0—8,0
Кислотное число в *мГ* КОН в 1 *Г* масла, не более	0,3	—	—	—
Зольность в %, не более	0,03	0,05	0,015	0,010
Водорастворимые кислоты и щелочи	Отсутствие			
Механические примеси в %, не более	0,007	0,1	Отсутствие	0,007
Вода в %, не более	Отсутствие	0,05	0,05	0,05
Температура вспышки (определяемая в открытом тигле) в °С, не ниже	215	240	300	310
Температура застывания в °С, не выше	+5	—	+17	−5
Коксуемость в %, не более	0,8	2,5	3,0	3,3 *
Технические условия по ГОСТ	1841-51		6411-52	

* Для масла „52" (Вапор) селективной очистки устанавливается коксуемость не более 2,8%.

КОНСИСТЕНТНЫЕ СМАЗКИ

Для смазывания трущихся пар там, где не удерживается или нежелательна жидкая смазка, применяются консистентные смазки, представляющие собой густые мази или плотные брикеты. Это — в основном минеральные масла, загущенные кальциевыми или натриевыми мылами жирных кислот.

В табл. 5—11 приведены физико-химические свойства основных консистентных смазок.

Примеры применения консистентных смазок

Низкоплавкие смазки с температурой каплепадения до 65° С (табл. 5).

„Пушечная" (смазка УНЗ) — для смазывания механизмов в летнее время и защиты от коррозии металлических поверхностей, не защищенных иными покрытиями.

„Универсальная низкоплавкая УН" (Вазелин технический) изготовляется марки УН1, — применяется для смазывания механизмов, защиты от коррозии металлических поверхностей, а также для технических целей в качестве мягчителя резиновых смесей и т. п.

„Водостойкая, морозостойкая ГОИ54" (Смазка УНВМ) — для смазывания аэронавигационных, оптических и радиоприборов, а также самолетов, работающих в интервале температур от −60 до +55° С.

„Приборная АФ-70" (Смазка УНМА) предназначается для смазывания приборов и механизмов при повышенных требованиях к прочности смазочной пленки.

Среднеплавкие смазки с температурой каплепадения до 100° С (табл. 6).

„Универсальная среднеплавкая УС" (Солидол жировой), изготовляется трех марок: УС-1 („пресс-солидол"), УС-2 (Л), УС-3 (Т).

„Универсальная среднеплавкая синтетическая УСс" (Солидол синтетический) изготовляется трех марок: УСс-1, УСс-2 и УСс-3.

„Морозостойкая НК-30 (Смазка УМ) — для смазывания частей системы управления самолетов и узлов трения, работающих в интервале температур от −60 до +85° С.

„Колесная" (УС) применяется для смазывания осей путевого транспорта.

„Графитная" (УСА) предназначается для смазывания шевронных открытых зубчатых колес прокатных станов и других высоконагруженных мест трения.

Тугоплавкие смазки с температурой каплепадения выше 100° С, табл. 7:

„Универсальная тугоплавкая водостойкая УТВ (смазка 1-13 жировая).

„Универсальная тугоплавкая морозостойкая УТМ" (смазка КВ), предназначается для смазывания механизмов, работающих при низких температурах.

„Универсальная тугоплавкая УТ" (консталин жировой).

„Универсальная тугоплавкая синтетическая УТс" (консталин синтетический). Изготовляется двух марок: УТс-1 и УТс-2.

„ЦИАТИМ-201" (смазка УТВМА), предназначается для смазывания приборов и механизмов, работающих в пределах температур от —60 до +120° С.

Таблица 5

Физико-химические свойства низкоплавких смазок

Показатели физико-химических свойств	Пушечная (УНЗ)	Универсальная низкоплавкая УН (Вазелин технический)	ГОИ 54	Приборная АФ-70
Внешний вид		Однородная мазь без комков от светло- до темно-коричневого цвета		
Температура каплепадения в °С не ниже	50	54	60	60
Вязкость кинематическая при 60° С в *сст* не менее	—	20	—	—
Кислотное число в *мГ* КОН на 1*Г* смазки, не более	0,3	0,28	0,1	—
Зольность в %, не более	0,07	0,07	—	—
Вода в %, не более		Отсутствие		
Механические примеси в %, не более	0,07 *	0,03	Отсутствие	
Водорастворимые: кислоты	—	Отсутствие	—	—
щелочи, не более	—	Следы	—	—
Проба на стабильность комка мази в течение 15 мин. при 20° С	—	Выдерживает	—	—
Испытание на коррозию на стальных пластинках в течение 48 час. при 60° С		Выдерживает		
То же на медных и алюминиевых пластинках в течение 48 час. при 60° С	—	—	Выдерживает	—
То же на латунных пластинках	—	—	—	Выдерживает
Испытание на коррозию на стальных и медных пластинках при 100° С в течение 3 часов	Выдерживает	—	—	—
Способность сохранять на поверхности металла непрерывный слой при температуре 60° С в течение 24 час. в *мГ/см²*, не менее	0,6	—	—	2
Вязкость кинематическая при 60° С в *сст*, не менее	40	—	—	—
Реакция смазки	Нейтральная или слабо щелочная	—	—	—
Пенетрация при 25° С	—	—	230—265	—
Испытание на термическую стабильность	—	—	Выдерживает	—
Испытание предохранительной способности на стальных пластинках при 50° С в течение 30 час.	Выдерживает	—	—	—
Растворимость в бензине	—	Выдерживает	—	—
Выделение масла из смазки при температуре 50° С в %, не более	—	—	—	6
Технические условия по ГОСТ	3005-51	782-53	3276—54	2967-52

* Песок и другие абразивные вещества не допускаются.

Физико-химические свойства среднеплавких смазок

Таблица 6

Показатели физико-химических свойств	Универсальная среднеплавкая						Морозостойкая НК-30 („УМ")	Колесная (УС)	Графитная (УСА)
	УС (Солидол жировой)			Синтетическая УСс (Солидол синтетический)					
	УС-1 („пресс-солидол")	УС-2 („Л")	УС-3 („Т")	УСс-1	УСс-2	УСс-3			
Мыло в %, не менее	9	11	18	9	11	14	—	—	—
Температура каплепадения в °С, не ниже	75	75	90	70	75	85	90	90	75
Пенетрация:									
при 50° С, не выше	—	—	—	400	380	340	—	—	—
при 25° С, в пределах	330—355	230—290	150—220	330—360	270—330	220—270	290—360	—	—
при 0° С, не ниже	—	—	—	230	200	160	—	—	—
Испытание на коррозию на металлических пластинках в течение 3 час. при 100° С	Выдерживает		—	Выдерживает в течение 72 час.			Выдерживает на стальных, медных и алюминиевых в течение 48 час. при 60° С	—	Выдерживает на стальных пластинках в течение 72 час.
Содержание свободных органических кислот	Отсутствие						—	—	—
Свободная щелочь в пересчете на NaOH в %, не более	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	—	—
Механические примеси в %, не более	0,3	0,4	0,6	0,5	0,6	0,6	0,03 *	—	—
Вода в %, не более	1,5	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	0,3	—	2
Вязкость кинематическая масла, входящего в смазку, при 50° С в *сст*, в пределах	38—52	17—40	27—52	41—53	19—53	41—53	—	—	—
Механические примеси, не растворимые в соляной кислоте	Отсутствие						—	—	—
Зольность в %, не более	—	—	—	—	—	—	2,2	10	—
Испытание на стабильность	—	—	—	—	—	—	—	—	Выдерживает
Реакция	—	—	—	—	—	—	—	Щелочная	—
Внешний вид	—	—	—	—	—	—	—	Однородная густая масляная масса темного цвета	Однородная масляная мазь черного цвета
Температура застывания масла, входящего в смазку в °С, не выше	—	—	—	—25	—20	—15	—	—	—
Стойкость смазки к изменениям температуры от —10 до +50° С	—	—	—	—	—	—	—	Выдерживает	—
Технические условия по ГОСТ	1033-51			4366-50			3275-46	3146-53	3333-46

* Песок не допускается.

Таблица 7

Физико-химические свойства тугоплавких смазок

Показатели физико-химических свойств	Универсальная тугоплавкая				Универсальная тугоплавкая синтетическая „УТс" (конталин синтетический)		ЦИАТИМ-201 (смазка УТВМА)
	Водостойкая УТВ (смазка 1-13 жировая)	Морозостойкая УТМ (смазка „КВ")	УТ (конталин жировой)				
			„УТ-1"	„УТ-2"	„УТс-1"	„УТс-2"	
Внешний вид	Однородная мазь без комков, от светло-желтого до темнокоричневого цвета	—	Однородная мазь без комков, от светло-желтого до темнокоричневого цвета		Однородная мазь темнокоричневого цвета		Однородная без комков, от светложелтого до темножелтого цвета
Температура каплепадения в °С, не ниже	120	120	130	150	130	150	170
Пенетрация:							
а) при температуре 25° С, в пределах	250—290	275—325	225—275	175—225	225—275	175—225	270—320
б) при — 10° С, не ниже	—	130	—	—	—	—	—
в) при — 40° С, не ниже	30	—	—	—	—	—	—
г) при — 50° С, не ниже	—	45	—	—	—	—	—
д) при — 60° С, не ниже	—	—	—	—	—	—	50
Испытание на коррозию при температуре 20° С:							
а) на стальных пластинках — в течение 72 час.	Выдерживает	—			Выдерживает		
б) на бронзовых пластинках — в течение 24 час.	То же	—	Выдерживает		—	—	—
Испытание на термическую стабильность	„	—	—	—	—	—	—
Испытание на химическую стабильность	„	—	—	—		Выдерживает	а) б) *
Свободные щелочи в пересчете на NaOH в %, не более	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	а) б) ** 0,1
Свободные кислоты			Отсутствие				—
Механические примеси		Отсутствие			Отсутствие		Отсутствие
Вода в %, не более	0,75	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	Отсутствие
Синерезис при 50° С в %, не более	—	6	—	—	—	—	—
Испытание предохранительной способности на стальных пластинках при толщине слоя смазки 0,2 *мм*	—	Выдерживает один цикл	—	—	—	—	—
Подвижность смазки при температуре —60°С в 1 сек. на один оборот подшипника, не более	—	—	—	—	—	—	10
Зольность в %, не более	—	—	4	4,5	4	4	—
Вязкость кинематическая масла, входящего в смазку, при 50° С в *сст*, в пределах	—	—	19—45	19—53	19—45	19—53	—
Технические условия по ГОСТ	1631-52	2931-51	1957-52		5703-51		6267-52

* При температуре 60° С в течение 24 час.: а) выделение масла в %, не более 4; б) испаряемость в %, не более 4.

** При температуре 100°С и давлении 8 *кГ/см²*, в течение 100 час.: а) снижение давления *кГ/см²* не более 0,35; б) кислотное число после окисления в *мГ* КОН на 1 *Г* смазки не более 1,0.

Таблица 8

Физико-химические свойства индустриальных смазок

Показатели физико-химических свойств	Индустриальная канатная ИК (мазь канатная)	Индустриальная для прокатных станов (смазка „ИП1")		Текстильная (смазка „ИТ")	Ротационная (смазка „ИР")	Газгольдерная ИГ		Для подшипников Каретникова ИПК
		„ИП1-Л"	„ИП1-З"			летняя „ИГ-1"	зимняя „ИГ-2"	
Внешний вид	—	Однородная мазь от желтого до темно-коричневого цвета		—	—	—	—	—
Температура каплепадения в °С не ниже	40	80	75	100	95	55	45	120
Пенетрация при 25° С, в пределах	—	260—310	310—350	275—325	275—350	225—300	275—325	200—255
Испытание на коррозию на стальных пластинках в течение 72 час.	Выдерживает **			**	***	—	—	****
Механические примеси, нерастворимые в соляной кислоте и несгораемые, в %, не более	—	Отсутствие						
Вода в %, не более	Отсутствие	2	2	Отсутствие				0,75
Зольность в %, не более	—	—	—	—	1,8	0,05	0,05	4,0
Вязкость очищенного минерального масла, входящего в смазку, при 100° С:								
а) кинематическая в *сст*	—	9,4—13,5	9,4—13,5	—	—	—	—	—
б) соответствующая ей условная в градусах	—	1,8—2,2	1,8—2,2	—	—	—	—	—
Водорастворимые кислоты и щелочи	Отсутствие	—	—	—	—	—	—	—
Реакция	—	—	—	—	Нейтральная или слабо щелочная	Нейтральная		—
Содержание серы в % не менее	—	0,3	0,3	—	—	—	—	—
Содержание свободных жиров в %, не более	—	—	—	—	—	—	—	0,5
Свободная щелочь в %, не более	—	—	—	0,05	—	—	—	0,2
Вязкость при 100° С условная в градусах, в пределах	1,4—2,5*	—	—	—	—	—	—	—
Смазка должна выдерживать:								
а) испытание на термическую стабильность	—	—	—	—	—	Выдерживает	—	—
б) испытание на стабильность в присутствии сероводорода или сернистого газа	—	—	—	—	—	Выдерживает		—
Технические условия по ГОСТ	5570-50	3257-53		4952-49	4874-49	4733-49		5649-51

* Вязкость определяется до введения в нее графита.
** Выдерживает на стальных пластинках по ГОСТ 5757-51.
*** Выдерживает на стальных пластинках в течение 3 час. при 100° С.
**** Выдерживает на стальных и бронзовых пластинках.

Индустриальные смазки (табл. 8). „Индустриальная канатная ИК" (мазь канатная) применяется для смазывания стальных канатов.

„Индустриальная для прокатных станов" (смазка ИП1) предназначается для смазывания тяжелых подшипников качения прокатных станов при централизованной системе питания. Смазка изготовляется двух марок — ИП1-Л (летняя) и ИП1-З (зимняя).

„Текстильная" (смазка ИТ) предназначается для смазывания колец текстильных крутильных машин.

„Ротационная" (смазка ИР) предназначается для смазывания подшипников ротационных машин.

„Газгольдерная ИГ" применяется для смазывания затворов сухих газгольдеров. Смазка изготовляется двух марок: ИГ-1 (летняя) и ИГ-2 (зимняя).

„Для подшипников Каретникова (ИПК)" смазка — с помощью суконки.

Смазка для автотранспорта (табл. 9). „Трансмиссионная" (смазка АТ) изготовляется двух марок: „Л" — летняя и „З" — зимняя; предназначается для смазывания редукторов троллейбусов.

„Автомобильная для переднего ведущего моста АМ" (карданная) применяется для смазывания поворотных цапф переднего ведущего моста автомобилей.

Морские смазки (табл. 10). Смазка „АМС" изготовляется двух марок: АМС-1

Таблица 9

Физико-химические свойства смазки для автотранспорта

Показатели физико-химических свойств	Трансмиссионные с присадкой		Автомобильная для переднего ведущего моста АМ (карданная)
	трансмиссионное „З"	трансмиссионное „Л"	
Вязкость при 100° С:			
а) кинематическая в *сст*	20,0—28,0	28,0—36,0	—
б) соответствующая ей условная в градусах	2,95—3,95	3,95—4,98	—
Кислотное число в *мГ* КОН на 1 *Г* смазки, не более	—	—	—
Вода в %, не более	Отсутствие		—
Механические примеси	Отсутствие		
Испытание на коррозию	Выдерживает *		
Сера в %, не менее	0,9	0,9	—
Зольность в %, не более	0,07	0,07	—
Температура застывания в °С, не выше	—10	—5	—
Пенетрация при 25° С, в пределах	—	—	220—270
Температура каплепадения в °С не ниже	—	—	115
Свободная щелочь в %, не более	—	—	0,1
Свободные кислоты	—**	Отсутствие	Отсутствие
Технические условия по ГОСТ	3823—54		5730-51

* На стальных пластинках в течение 3 час. при 100° С.
** Водорастворимых.

Таблица 10

Физико-химические свойства морских смазок

Показатели физико-химических свойств	АМС-1	АМС-3
Внешний вид	Однородная мазь без комков, темного цвета	
Температура каплепадения в °С, не ниже	85	95
Пенетрация при 25° С, в пределах	300—350	200—250
Механические примеси	Отсутствие	
Вода	Отсутствие	
Испытание предохранительной способности на стальных и латунных пластинках при 50° С в течение 24 час.	Выдерживает	
Технические условия по ГОСТ	2712-52	

и АМС-3; предназначается для смазывания механизмов, работающих в воде или соприкасающихся с водой.

Смазки предохранительные (табл. 11).

„Морская МП" (смазка УТС-1) предназначается для непродолжительной консервации шлифованных и полированных металлических поверхностей, находящихся в атмосфере водяных паров.

Предохранительная „СП-2" (смазка 59) применяется при обработке внутренних поверхностей двигателя и других его деталей.

Предохранительная „СП-3" (смазка 59ц) применяется при обработке внутренних поверхностей двигателей, работающих на топливе, содержащем этиловую жидкость.

„Ружейная" (смазка ВО), предназначается для смазывания механизмов и кратковременной защиты металлических поверхностей от коррозии летом, весной и осенью.

„Графитная" (БВН-1) применяется для смазывания сопрягаемых поверхностей стальных труб, подвергающихся при эксплуатации температурным изменениям.

Таблица 11

Смазки предохранительные

Показатели физико-химических свойств	Морская МП (Смазка УТС-1)	СП-2 (Смазка 59)	СП-3 (Смазка 59)	Ружейная (Смазка ВО)	Графитная (БВН-1)
Вязкость при 50° С:					
а) кинематическая в *сст*	28,4—48,0	—	—	65; 10*	—
б) соответствующая ей условная в градусах	4,0—6,5	—	—	—	—
Кислотное число в *мГ* КОН на 1 *Г* смазки, не более	1,05	—	—	0,35	0,1
Зольность в %, не более	0,05	0,013	0,05	0,05	—
Механические примеси в %, не более		Отсутствие		0,05***	—
Вода или влага			Отсутствие		
Испытание на предохранительную способность на стальных пластинках в течение 72 час.	Выдерживает	—	—	—	—
Испытание корродирующего действия смазки при температуре 20 ± 2° С в течение 24 час.	—	Выдерживает		Выдерживает**	Выдерживает****
Реакция смазки после выдерживания в термостате при температуре 100 ± 2° С в течение 6 час. и последующего охлаждения до температуры 20 ± 2° С	—	Щелочная	—	Нейтральная или слабощелочная	—
Водорастворимые кислоты и щелочи	Отсутствие	—	—	—	—
Устойчивость эмульсий при температуре 20 ± 2° С в течение 24 час.	—	—	Не расслаивается	—	—
Способность сохранять на поверхности металла непрерывный слой при температуре 20° С в течение 24 час. в *кГ/см²*, не менее	—	—	—	1,5	—
Испытание на стабильность (однородность) при температуре 15—20° С в течение 5 дней	—	—	—	Выдерживает	—
Технические условия по ГОСТ	4700-49	5699-51	5702-51	3045-51	5656-51

* При 100° С.

** На стальных пластинках при температуре 100° С в течение 3 час.

*** Песок и другие абразивные вещества не допускаются.

**** На стальных пластинках в течение 72 час. при температуре 18 ± 2° С.

ПРОЧИЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Порошкообразные, твердые и коллоидные смазки. Из минеральных смазывающих твердых порошков применяют графит, слюду и тальк. Порошки трех первых веществ применяются для смазывания горячих трущихся пар. Графит применятся в чешуйчатой и в коллоидальной формах.

Коллоидальный графит в присутствии масла графитирует трущиеся металлические поверхности, образуя в результате адсорбции пленку; графит проникает и удерживается даже в мельчайших неровностях и порах металла. При графитной смазке можно применять более жидкое масло. При графитированных вкладышах уменьшается пусковое трение и происходит ускоренная приработка поверхностей.

Примесь коллоидального графита к моторному маслу облегчает пуск двигателя при низкой температуре окружающей среды и повышает стойкость масла в работе при высокой температуре.

Водная графитная смазка применяется для смазки паровых и компрессорных цилиндров, валков и штампов.

Консистентная графитная смазка рекомендуется для пуска и приработки трущихся поверхностей двигателей внутреннего сгорания (поршней и цилиндров).

Эмульсионные смазки. Эмульсионные смазки применяются для смазки паровых машин (с примесью щелочного известкового раствора) и в качестве охлаждающих смесей при резании металлов.

Для смазки подшипников рекомендуется следующий состав эмульсий: смесь на 50 частей воды содержит минерального масла 50%, воды 12—13%, антисептика 2—12%, мыла 28% и свободных жирных кислот 6%.

Смазка водой. Вода как смазочный материал применяется для вкладышей из бакаута, дальневосточной березы, самшита, текстолита, лигностона, лигнофоля, а также для смазки резиновых подшипников.

Смазка воздухом. Смазка воздухом находит применение в легко нагруженных и особо быстро вращающихся подшипниках, в которых при быстром вращении цапфа всплывает на воздушной прослойке.

Воздушная смазка находит применение в подшипниках быстро вращающихся шпинделей для шлифования отверстий малого диаметра.

Силиконы в качестве смазок. Характерные свойства силиконовых жидкостей[6]: высокая термоустойчивость, стойкость в отношении окисления, малая испаряемость, низкая температура застывания, пологая кривая вязкости. Смазочная способность силиконов невысока.

Силиконовые жидкости применимы для смазки приборов, в качестве рабочей жидкости гидравлических передач и т. д.

Силиконовые консистентные смазки применимы для смазывания шариковых подшипников в условиях тяжелых режимов.

ЗАМЕНА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Замена масел. Замена одного смазочного масла другим производится по признаку вязкости. Заменитель должен иметь равную вязкость или несколько более высокую, но не вызывающую перегрева механизма. Разница в вязкости не должна превышать 2° условной.

Если машина работает в холодном помещении, то при замене основного масла необходимо принимать во внимание и температуру его застывания.

В качестве смазки с очень малой вязкостью (например, для опор быстроходных шлифовальных шпинделей) употребляют смесь масла „индустриальное 12" (веретенное 2) с очищенным керосином. Пропорцию составляют в зависимости от требуемой вязкости.

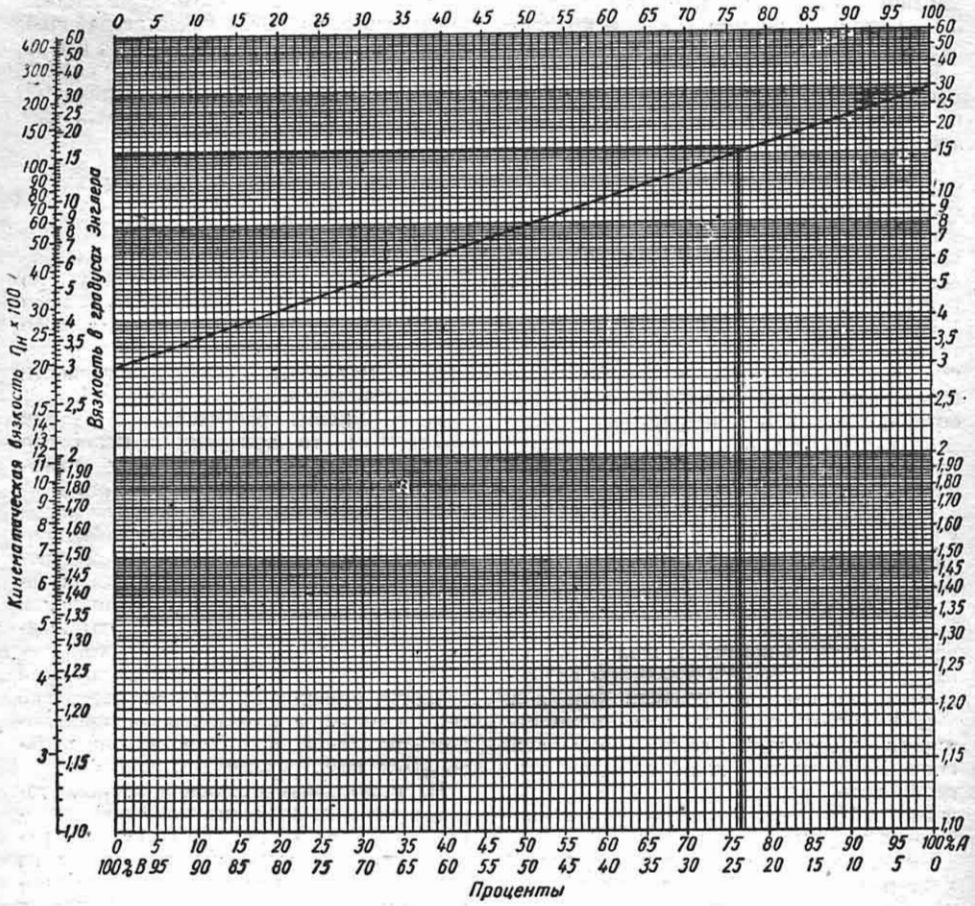
При отсутствии заменителя нужной вязкости смешивают два или несколько сортов масла в определенном процентном отношении; при этом можно пользоваться номограммой (см. фигуру).

На номограмме с левой и правой стороны указаны значения условной вязкости (в °E) от 1 до 60. Нижняя и верхняя линии номограммы разделены на 100 частей; деления соответствуют процентному соотношению смешиваемых сортов масла.

Пример пользования номограммой. Из двух продуктов: *A* условной вязкостью 30° и *B* вязкостью 3° при той же температуре требуется получить продукт вязкостью 15,5°.

Соединяем две точки номограммы, определяющие вязкость 30° и 3°, прямой; от точки, находящейся на левой вертикальной шкале, отвечающей вязкости 15,5°, проводим горизонтальную прямую до пересечения ее с наклонной линией, соединяющей деления 30° и 3°.

Из точки пересечения обеих линий проводим вертикальную прямую до пересечения с нижней горизонтальной шкалой, на которой и найдутся искомые проценты: масла A — 76,5%, масла B — 23,5%. Необходимо учитывать, что температуры вспышки и застывания смеси будут отличаться от температур, взятых для смеси масел.



Замена консистентных смазок. Основными свойствами консистентных смазок, которые учитываются при их замене, являются температура каплепадения, пенетрация* и их основания (кальциевые или натровые).

В условиях влажной среды применяются только кальциевые смазки — солидолы.

В исключительных случаях солидолы могут быть заменены консталинами, но необходимо иметь в виду, что срок службы этих заменителей должен быть уменьшен, и контроль за трущимися парами должен быть усилен.

Смазка 1-13 для подшипников качения при малых скоростях и при температуре не выше +50 —65° С может быть заменена солидолами, при больших и средних скоростях — консталинами. При этом необходимо, чтобы число пенетрации было по возможности такое же, как у основного сорта смазки.

* Консистентная смазка характеризуется пенетрацией, выражаемой в градусах глубины погружения конуса за 5 сек. Чем мягче мазь, тем больше число пенетрации.

ПРИСАДКИ К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Применение присадок способствует улучшению различных свойств масел.

Присадки добавляют в количествах от долей процента до 3% и более [1].

Присадки, улучшающие физические и физико-химические свойства масел

а) Для улучшения смазочной способности масла, т. е. повышения прочности масляной пленки при высоких давлениях, применяют присадки различных растительных и животных жиров в количестве 3—5%, жирные кислоты, кетоны, амиды и нитрилы жирных кислот, особенно — полимеризованные нитрилы. Большой эффективностью обладают метилдихлорстеарат и олеиновая кислота.

б) Для повышения нагрузочной способности масел и снижения износа деталей, особенно при внезапных и сверхвысоких давлениях (доходящих до 25 000 — 30 000 $кГ/см^2$) (гипоидные зацепления), рекомендуются присадки, содержащие до 35% хлора, а также — смеси, состоящие из 70—80% (по весу) хлорированного парафина и 20—30% дибензилдисульфида.

в) Для облегчения запуска двигателя внутреннего сгорания и его стартера при низких температурах рекомендуется применять присадку из тристеарата алюминия.

г) Для повышения индекса вязкости применяют суперол, получаемый путем полимеризации изобутена в присутствии $AlCl_3$. Присадка 2% суперола к маслу АК-10 (автолу 10) повышает его вязкость, в условных градусах при 50° С, на 11,7 единицы, а АК-15 (автол 18) — на 14,7 единицы.

д) Для понижения температуры застывания масел и улучшения подвижности их при низких температурах применяют депрессатор АзНИИ, способный снижать температуру застывания автолов примерно на 20°. Присадка 1% данного депрессатора к парафинистым дистиллатным маслам способна снизить температуру застывания их на 40—50°. Присадка его к депарафинированным остаточным маслам не эффективна.

Рекомендуется также применение парафина, получаемого конденсацией хлорированного парафина и нафталина в присутствии $AlCl_3$.

Присадки, повышающие стабильность масла

а) Для противодействия окислению масла рекомендуются присадки фосфатных соединений [например $(C_4H_9)_8PO_4$, трибутиленфосфат] в количестве 0,1—1%, а также оксидифениламин $C_6H_5 \cdot NH \times \times C_6H_4 \cdot OH$. Последний, будучи введен в масло в количестве не более 0,01%, снижает образование кислых осадков в масле в 1,5—2 раза.

б) Для понижения нагарообразования и пригорания поршневых колец применяются так называемые „моющие присадки" ЦИАТИМ-330 (НАКС) и ЦИАТИМ-331, а также многофункциональные присадки (ЦИАТИМ-336, НАМИ-25 и АзНИИ-4).

в) Для предотвращения коррозии подшипников из кадмиево-серебряных, кадмиево-никелевых и медно-свинцовых сплавов применяют присадки трифенила, трибутилфосфита, ЦИАТИМ-336, НАМИ-25 и АзНИИ-4. Хорошие результаты дает олеиновая кислота, входящая в состав масла УТС-1 (ГОСТ 4700-49), а также присадки, содержащие жирные кислоты и их эфиры, и нафтеновые кислоты и их соли.

Подобные присадки применяются тогда, когда та или иная деталь не может быть покрыта слоем защитной консистентной смазки, применяемой против ржавления.

г) Против вспенивания масла применяются силиконы, добавляемые к маслу в количестве меньше 0,1%.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Вильямс В. Р., Топливо, смазочные материалы и вода, Сельхозгиз, 1951.
2. Воларович М. П., Вязкость смазочных масел при низких температурах, ч. I, АН СССР, 1944.
3. Зайцев А. К., Основы учения о трении, износе и смазке машин, ч. IV, Смазка машин, Машгиз, 1948.
4. Папок К. К. и Рагозин Н. А., Технический словарь по топливу и маслам, Гостоптехиздат, 1951.
5. Португалова А. А. и Спицын Н. А., Подшипниковые узлы высокоскоростных приводов, ЭНИИПП, Машгиз, 1948.
6. Применение силиконов в качестве смазок Бюро ТЭИ, ЦИМТНЕФТЬ, 1947.
7. Справочник норм расхода смазочных и обтирочных материалов, Оргтяжмаш, Машгиз, 1947.
8. Справочник по применению и нормам расхода смазочных материалов, ВНИТО нефтяников, Гостоптехиздат, 1947.
9. Иванов Р. Г., Голенев П. М., Тиндо П. С. Смазочные масла и консистентные смазки, Стандартгиз, 1949.
10. Моторные топлива, масла и жидкости, под ред. К. К. Папок и Е. Г. Семенидо, том II, Гостоптехиздат, 1953.

ГЛАВА VIII

ОПТИКА

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основные световые величины и единицы их измерения даны в табл. 1.

Для нормального глаза, воспринимающего световую энергию с длиной волны $380\ ммк < \lambda < 780\ ммк$, полный световой поток

$$F = \sum_{\lambda=380\ ммк}^{\lambda=780\ ммк} V_\lambda \cdot \Phi_\lambda,$$

Таблица 1

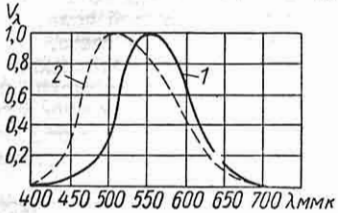
Световые величины и их единицы

Термин	Обозначение	Определение	Связь с другими величинами	Единица измерения	
				Обозначение и наименование	Выражение через другие единицы
Световой поток	F	Лучистый поток, оцениваемый по световому восприятию		*лм* (люмен)	
Сила света	I	Отношение светового потока, излучаемого внутри телесного угла, к величине этого угла	$I = \frac{F}{\Omega}$	*св* (свеча)	$\frac{лм}{стерадиан}$
Освещенность (плотность освещения поверхности)	E	Световой поток, падающий на единицу поверхности	$E = \frac{F}{S}$	*ф* (фот)	$\frac{лм}{см^2}$
Светимость (плотность свечения)	R	Световой поток, излучаемый единицей светящейся поверхности во всех направлениях	$R = \frac{F}{S}$	*лк* (люкс)	$10^{-4}\ \frac{лм}{см^2}$
Яркость	B	Отношение силы света к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению луча	$B = \frac{I}{S \cos i'}$	*сб* (стильб)	$\frac{лм}{стерадиан \cdot см^2}$

Примечания: 1. В формуле яркости i' — угол отклонения луча от нормали к светящейся поверхности.

2. Стерадиан (стереорадиан) — единица измерения телесных углов. Стерадиан равен такому телесному углу, который вырезает из сферы радиуса r с центром в вершине угла поверхность, содержащую r^2 единиц площади.

где Φ_λ — монохроматический лучистый поток для данной длины волны, а V_λ — видность для глаза в долях единицы (фиг. 1).



Фиг. 1. График видности: *1* — дневное зрение; *2* — сумеречное зрение.

Для точечного источника света

$$E = \frac{I \cos i}{l^2},$$

где i — угол падения луча на поверхность; l — удаленность поверхности от источника света.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Основные виды современных — как правило, электрических — искусственных источников света: лампы накаливания, в которых светятся тела накала, нагреваемые электрическим током; газосветные лампы, в которых светятся газы или пары металлов под действием электрического разряда; дуговые лампы, в которых происходит как тепловое излучение угольных электродов, так и свечение паров при разряде между электродами.

Источники света излучают как видимые, так и невидимые лучи. Общую характеристику состава излучения дает отношение светового потока к полному лучистому потоку Φ, называемое *световой отдачей излучения*:

$$\eta_{изл} = \frac{F}{\Phi} \ лм/вт.$$

Максимальное значение $\eta_{изл} = 621 \ лм/вт$ имеет место для монохроматического света с длиной волны $\lambda = 556 \ ммк$, к которому глаз наиболее чувствителен.

Отношение светового потока к полной мощности W, потребляемой источником света, называется *световой отдачей источника*:

$$\eta_{ист} = \frac{F}{W} \ лм/вт.$$

Для обычных источников $\eta_{ист}$ равняется нескольким десяткам $лм/вт$. Основные данные азотных и аргоновых ламп накаливания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные данные азотных и аргоновых осветительных ламп накаливания

Показатели	Потребляемая мощность в *вт*			
	50	100	300	1000
Температура нити в °К	2685	2760	2870	2 990
Световой поток в *лм*	500	1275	4875	19 000
Средняя сила света в *св*	40	102	390	1 520
Световая отдача лампы в *лм/вт*	10,00	12,75	16,25	19,00
К. п. д. излучения в %	1,61	2,05	2,62	3,06

Световая отдача применяемых натриевых и ртутных газосветных ламп составляет 40—60 *лм/вт*, а их к. п. д. излучения равен 6,5—9,5%.

Яркость источников света в *сб*

Свеча	0,6
Керосиновая лампа	1,5
Лампа накаливания с рассеивающей колбой	2,0
Вольфрамовая нить лампы накаливания	500
Дуга с простыми углями	15 000
Дуга с высокоинтенсивными углями	До 90 000
Поверхность солнца	100 000
Ртутная лампа сверхвысокого давления	До 180 000

Данные о яркости светящихся составов для нанесения шкал приведены в табл. 3.

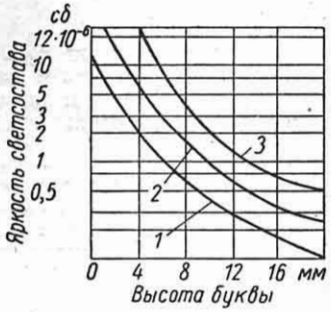
Таблица 3

Отечественные светящиеся составы

		Марки составов									
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
		Яркость в *сб* $\times 10^{-6}$									
Начальная		0,50	1,00	1,50	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	8,00	10,00
Через	1 год	—	—	—	1,85	2,45	2,70	3,15	3,45	3,90	4,40
	2 года	—	—	—	1,75	2,25	2,35	2,55	2,70	2,90	3,00
	3 года	—	—	—	1,70	2,10	2,15	2,20	2,20	—	—
	4 года	0,45	0,90	1,30	1,65	—	—	—	—	—	—

Применение дорогостоящих составов марок К-Е целесообразно только при необходимости обеспечения очень яркой видимости для быстрых отсчетов и при небольших сроках службы.

Рекомендуемая толщина слоя светящегося состава 0,1—0,2 *мм*. Размер букв выбирается в зависимости от расстояния до наблюдателя и яркости светящегося



Фиг. 2. График яркости светящихся составов: *1*—0,5 *м*; *2*—1 *м*; *3*—2 *м*.

состава. График яркости светящихся составов приведен на фиг. 2, где даны кривые для различных расстояний наблюдений.

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Интерференция света

Интерференцией света называется сложение в пространстве двух или нескольких световых волн с одинаковыми периодами, в результате которого в разных точках пространства получается усиление или ослабление амплитуды результирующей световой волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся волн. Явление интерференции наблюдается при соединении только когерентных световых волн, т. е. таких волн, для которых за время, достаточное для наблюдения, сохраняется неизменная разность фаз. Интенсивность результирующего колебания в этом случае отличается от суммы интенсивностей составляющих колебаний и может быть меньше или больше ее в зависимости от разности фаз. Способность когерентных волн к интерференции означает, что в любой точке, которой достигнут эти волны, имеют место когерентные колебания. Они будут интерферировать, если ориентация и поляризация волн таковы, что направления колебаний совпадают. Результат интерференции определяется разностью фаз интерферирующих волн в месте наблюдения, которая зависит от начальной разности фаз этих волн и от разности расстояний, отделяющих точку наблюдения от источника каждой волны.

Создать два источника света, излучающих строго монохроматический свет одного периода, практически невозможно, а следовательно, получить устойчивую интерференцию света от двух или нескольких независимых источников также практически нельзя.

В оптических приборах интерференция света создается при соединении двух или нескольких световых пучков, исходящих из одного источника света и прошедших до места наблюдения интерференции пути разной длины. В этом случае источник может быть как с монохроматическим, так и со сложным белым светом. Последний широко применяется, например, при массовой проверке качества поверхностей оптических деталей и плоскопараллельных концевых мер методом пробных стекол. Монохроматический свет получают с помощью монохроматора от электролюминесцирующих спектральных ламп. В технических интерферометрах чаще всего применяют ртутные лампы.

Явление интерференции света широко используется в машиностроении и приборостроении в различных оптических приборах для контроля качества и чистоты поверхности, поверки длины концевых мер, испытания объективов и телескопических систем и для других целей. Подробные сведения о технических применениях интерференции см. [2], а также т. 4, гл. I.

Здесь мы поясним принцип одного из технических применений интерференции света на примере интерференции в тонких слоях. Пусть луч света падает перпендикулярно поверхности, ограничивающей воздушный слой между этой эталонной поверхностью и испытуемой поверхностью. Луч частично отразится от поверхности, частично пройдет в воздушный слой и опять частично отразится от испытуемой поверхности. Между отраженными лучами создается разность хода, равная удвоенной толщине воздушного слоя $2d$. Лучи когерентны и создают интерференцию света, максимум которого будет при $2d = 0, \lambda, 3\lambda, \ldots$, т. е. при $d = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda \ldots$, а

минимум при $d = \frac{\lambda}{4}, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda \ldots$ Если испытуемая поверхность неправильна, то толщина воздушного слоя будет различна в разных местах. Это создает различную разность хода в разных местах испытуемой поверхности. При освещении монохроматическим светом отдельные участки слоя будут освещены различно. При освещении сложным светом слой будет окрашен в разные цвета, что связано с различной длиной волны составляющих сложного цвета. Наблюдая интерференцию в воздушном слое между эталонной и испытуемой поверхностями, можно оценить качество изготовления последней по характеру интерференционной картины.

Поляризация света

Согласно электромагнитной теории изменение во времени электрической напряженности $\overline{E}$ сопровождается появлением переменного магнитного поля $\overline{H}$, направленного перпендикулярно вектору $\overline{E}$.

Это явление обладает свойством обратимости. Переменное электромагнитное поле не остается неподвижным в пространстве, а распространяется со скоростью света V вдоль линии, перпендикулярной векторам $\overline{E}$ и $\overline{H}$, образуя электромагнитные волны, частным случаем которых являются световые волны. Перпендикулярные друг другу и вектору $\overline{V}$ векторы $\overline{E}$ и $\overline{H}$ относительно вектора $\overline{V}$ могут быть ориентированы в плоскости произвольно, т. е. луч не является осью симметрии электромагнитных волн. Такая асимметрия характерна только для поперечных волн. Следовательно, световые волны поперечны. Иллюстрацию этой асимметрии можно получить в опыте с помощью какой-либо системы, обладающей свойством асимметрии, как, например, кристалла, атомы которого располагаются в виде пространственной решетки таким образом, что свойства кристалла по разным направлениям различны. Поставим перпендикулярно направлению распространения естественного света, в котором поперечные колебания происходят во всевозможных направлениях, две пластинки из обладающего свойством анизотропии кристалла турмалина. Плоскости пластинок должны быть параллельны осям кристаллов.

Первая пластинка пропустит только половину падающего естественного света, и за ней окажутся световые волны с одним направлением вектора $\overline{E}$, параллельным оси кристалла.

Такой свет с единственным направлением вектора $\overline{E}$ и взаимосвязанного с ним вектора $\overline{H}$ называется плоскополяризованным. Плоскость, в которой расположен вектор $\overline{E}$, называется плоскостью колебания поляризованного света, а плоскость, в которой расположен вектор $\overline{H}$, — плоскостью поляризации.

Если поворачивать вторую пластинку, то интенсивность прошедшего через пластинки света будет меняться пропорционально $\cos^2\alpha$ (α — угол между кристаллическими осями пластинок) и будет максимальна при $\alpha = 0$, минимальна при $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

Это означает, что вторая пластинка пропускает только ту часть света, поляризованного первой пластинкой, которая соответствует проекции электрического вектора $\overline{E}$ поляризованного света на кристаллическую ось второй пластинки. Явление поляризации света имеет место также при отражении или преломлении света на границе изотропных диэлектриков (стекло, мрамор и т. д.).

Полная поляризация света, отраженного диэлектриком, имеет место в том случае, когда тангенс угла падения луча света $\operatorname{tg} i$ равен относительному показателю преломления $n_{1,2}$ (см. стр. 229). При этом плоскость поляризации совпадает с плоскостью падения луча. Преломленный на границе прозрачного диэлектрика свет поляризуется в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации отраженного света. Полной поляризации отраженного света не происходит, а максимальная поляризация имеет место при $\operatorname{tg} i = n_{1,2}$ и достигает, например, для стекла 15%.

Для получения полной поляризации преломленного света можно применять 8—10 стеклянных пластинок (стопу) с последовательным преломлением. В качестве поляризаторов и анализаторов часто применяют поляроиды в виде прозрачной пластинки с тонким слоем (порядка 0,1 *мм*) дихроичных кристаллов (герапатит и др.) или в виде тонких пластин дихроичных кристаллов. Они менее прозрачны, чем поляризационные призмы из исландского шпата, и не

обеспечивают полной поляризации крайних лучей спектра (фиолетовых и красных). Однако ввиду возможности их изготовления с относительно большой поверхностью и их невысокой стоимости они успешно применяются в технике.

Эллиптическая поляризация света имеет место при пропускании луча плоско поляризованного монохроматического света через пластинку из одноосного кристалла толщины d, так что ее поверхность перпендикулярна лучу, а ее кристаллическая ось составляет с вектором $\overline{E}$ поляризованного света острый угол α.

Скорость распространения света в кристаллах зависит от направления луча и от направления колебаний в этом луче, т. е. от поляризации. Поэтому в кристаллах наблюдается явление двойного лучепреломления. Луч, падающий на кристалл, разделяется на два луча, поляризованные в двух главных направлениях пластинки (по ее кристаллической оси и перпендикулярно этой оси) и распространяющиеся с разными скоростями. Пройдя через пластинку, лучи сдвинутся по фазе и будут различны по амплитуде $\left(\text{если угол } \alpha \neq \frac{\pi}{4}\right)$. Сложение двух взаимно перпендикулярных световых колебаний с разными амплитудами и фазами создаст эллиптические световые колебания, при которых конец результирующего вектора описывает эллипс. Частота исходных и эллиптических колебаний одна и та же. Такой свет называется эллиптически поляризованным.

В частном случае, когда $\alpha = \frac{\pi}{4}$ и толщина пластинки такова, что разность хода двух лучей составляет четверть волны, эллипс превращается в круг, и имеет место круговая или циркулярная поляризация.

Более подробные сведения о поляризации света и интерференции поляризованных лучей см. [4]. О применении оптической поляризации для исследования напряжений в деталях см. т. 3, гл. XIV.

Диффракция света

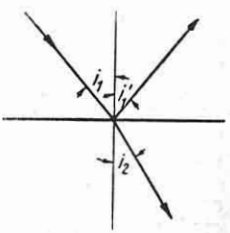
Диффракцией света называется явление огибания световыми волнами препятствий, стоящих на пути распространения света. Диффракция имеет место только в том случае если размер препятствия или отверстия соизмерим с длиной волны света. Для видимых лучей света длина волны лежит в пределах десятых долей микрона. В этом случае препятствия или отверстия, измеряющиеся в *мм*, уже относительно велики по сравнению с длиной волны. Поэтому диффракцией во многих случаях можно пренебрегать и считать, что свет распространяется прямолинейно, как это и делается в геометрической оптике. О специальных использованиях явления диффракции см. [4]. Другие сведения по физической оптике — там же.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Геометрическая оптика изучает пучки лучей света, исходя из законов прямолинейности и независимости их распространения и из законов отражения и преломления света. Так как при больших углах падения в оптических системах возникают оптические аберрации, то простейшие оптические системы целесообразно использовать только в параксиальной области, близкой к оптической оси, где углы падения и преломления могут считаться достаточно малыми. Последующий материал дан применительно к этому случаю.

Распространение света в средах. В прозрачной среде свет распространяется прямолинейно, а на границе сред частично преломляется и частично отражается.

Закон отражения: падающий луч, отраженный луч и нормаль к границе сред лежат в одной плоскости; угол отражения i_1' равен углу падения i_1. Схема распространения луча света через границу сред дана на фиг. 3.



Фиг. 3. Схема распространения луча через границу сред.

Закон преломления: падающий луч, преломленный луч и нормаль к границе сред лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения i_1 к синусу угла преломления i_2 есть величина постоянная, равная отношению скоростей распространения света в этих средах:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{1,2}.$$

Здесь $n_{1,2}$ — *относительный показатель преломления* второй среды относительно первой.

Для пустоты $v_0 = 300\,000$ *км/сек* и $n = 1$.

Для воздуха $n_в = 1{,}00029 \approx 1$.

Отношение скорости света в пустоте к скорости света в среде $n = \frac{v_0}{v}$ — *абсолютный показатель преломления.*

Значения показателей преломления

Бензол	1,50
Вода	1,33
Глицерин	1,47
Кварц плавленый	1,46
Кварц кристаллический	1,55
Канадский бальзам	1,54
Лед	1,31
Спирт этиловый	1,36
Стекло	1,50—1,75
Флюорит	1,43
Эфир	1,35

В случае прохождения света из оптически более плотной среды в менее плотную при $i_1 > i_{\max}$ имеет место явление полного внутреннего отражения, при котором вся световая энергия, не претерпевая преломления, отражается внутри первой среды.

Предельный угол полного внутреннего отражения определяется формулой.

$$\sin i_{\max} = \frac{n_2}{n_1}.$$

На этом явлении основано устройство призм полного внутреннего отражения, освещение сеток в оптических приборах и т. д.

При распространении света имеют место потери энергии на поглощение в средах и на преломление и отражение на границах сред.

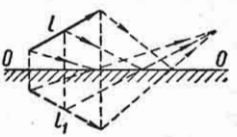
Коэффициент пропускания оптической системы

$$T = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \cdot 0{,}99^l \cdot 0{,}96^{N_1} \cdot 0{,}95^{N_2} \cdot 0{,}94^{N_3},$$

где l — длина пути луча в среде в *см*; n и n' — показатели преломления первой и последней сред; N_1 и N_2 — числа преломлений соответственно на поверхностях кронов и флинтов; N_3 — число посеребренных отражающих поверхностей.

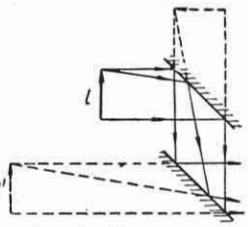
Просветление оптики повышает прозрачность оптической системы за счет нанесения на поверхность стекла прозрачной пленки с показателем преломления $n_{пл} = \sqrt{n}$. Наилучшее просветление достигается при толщине пленки $d = \frac{\lambda}{4}$, где λ — длина волны проходящего света. Просветление осуществляется химическим способом путем образования на поверхности стекла кремнеземной пленки либо физическим способом путем нанесения на поверхность стекла пленки фторида магния или кальция (способы акад. И. В. Гребенщикова). Физический метод более эффективен, но пленки фторидов механически непрочны. Поэтому внешние поверхности оптики просветлять физическим способом нельзя.

Преломление и отражение луча на плоских поверхностях. Плоские зеркала применяются для изменения направления светового луча или пучка лучей. Плоское зеркало OO (фиг. 4) дает мнимое, повернутое на 180° изображение предмета без изменения его масштаба. Поворот зеркала на угол α, вызывающий изменение угла падения луча i, дает отклонение отраженного луча от его первоначального положения на угол 2α.

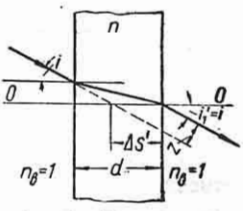


Фиг. 4. Схема отражения луча на плоском зеркале.

Система двух параллельных зеркал (фиг. 5) дает прямое изображение вследствие взаимной компенсации поворотов изображения на 180°. Такая система применяется, например, в простейшем перископе.



Фиг. 5. Система двух параллельных зеркал.



Фиг. 6. Схема прохождения луча через плоско-параллельную пластину.

Плоско-параллельная пластина (фиг. 6) не изменяет направления луча, а сообщает ему осевое смещение

$$\Delta s' = d\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

и поперечное смещение

$$z = d \cdot i\left(1 - \frac{1}{n}\right),$$

Таблица 4

Коэффициенты потерь на отражение на поверхности стекла

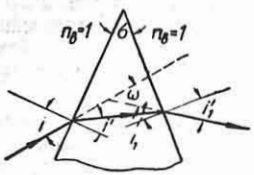
Сорт стекла	Показатель преломления n_D	Коэффициент потерь на отражение на поверхности стекла в %			
		непросветленной	обработанной 0,5%-ным раствором уксусной кислоты	с пленкой из 5%-ного спиртового раствора кремнеэтилового эфира	с пленкой фторида магния или кальция
К8	1,5163	4,21	2,20	2,10	0,30
БК10	1,5688	4,90	1,80	1,90	0,10
БФ12	1,6259	5,68	1,50	1,50—1,90	0,30
ЛФ5	1,5749	4,97	1,73	1,90	0,50
ТК6	1,6126	5,50	1,80	2,10	0,40
ТФ3	1,7172	6,78	1,10	1,90	0,10

где d — толщина пластинки; i — угол падения луча; n — показатель преломления стекла пластинки.

Призма — прозрачное тело, ограниченное непараллельными отражающими и преломляющими плоскостями.

Угол ω — отклонения монохроматического луча в призме (фиг. 7) — определяется формулой

$$\sin\frac{1}{2}(\sigma+\omega)=\frac{n\sin\frac{1}{2}\sigma\cdot\cos\frac{1}{2}(i'+i_1)}{\cos\frac{1}{2}\left(i+i_1'\right)};$$



Фиг. 7. Схема прохождения луча через призму.

в случае симметричного хода луча в призме ($i=-i_1'$ и $i'=-i_1$) формула имеет вид

$$\sin\frac{1}{2}(\sigma+\omega)=n\sin\frac{1}{2}\sigma;$$

для клина — призмы с малым σ

$$\omega\approx(n-1)\sigma,$$

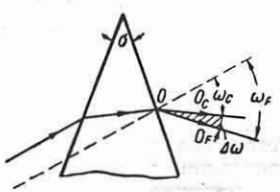
где σ — преломляющий угол призмы; n — показатель преломления стекла призмы для данного монохроматического луча.

Если через призму проходит не монохроматический луч, то вследствие различных для разных цветов показателей преломления стекла луч разлагается призмой на спектр (фиг. 8). Это явление называется *дисперсией света* и характеризуется углом средней дисперсии между красным и зелено-голубым лучами.

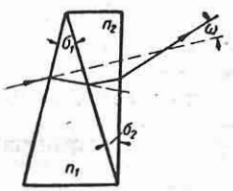
Для клина угол средней дисперсии

$$\Delta\omega=(n_F-n_C)\cdot\sigma=\Delta n\cdot\sigma,$$

где n_F — показатель преломления для зелено-голубого луча, соответствующий $\lambda=486$ *ммк*; n_C — показатель преломления для красного луча, соответствующий $\lambda=656$ *ммк*; $\Delta n=(n_F-n_C)$ — *средняя* дисперсия.



Фиг. 8. Схема дисперсии в призме.



Фиг. 9. Ахроматический клин.

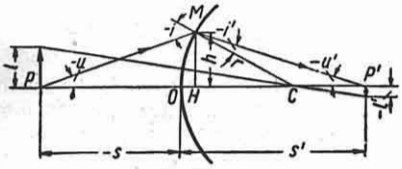
Ахроматические клинья изготовляются путем склеивания двух клиньев из различного стекла с противоположным расположением преломляющих углов σ_1 и σ_2 (фиг. 9). Преломляющие углы клиньев в данном случае определяются по формулам

$$\sigma_1=\frac{\omega}{\Delta n_1(\nu_1-\nu_2)}\quad\text{и}\quad\sigma_2=\frac{\omega}{\Delta n_2(\nu_1-\nu_2)},$$

где ω — необходимый угол отклонения луча; Δn_1 и Δn_2 — средние дисперсии стекла клиньев; ν_1 и ν_2 — коэффициенты дисперсии стекла клиньев, выражающиеся формулой $\nu=\frac{n-1}{\Delta n}$.

Преломление луча на сферических поверхностях. Сферическая граница (фиг. 10) сред, имеющих показатели преломления n и n', с осью OC и центром кривизны C, пересекается в точке M лучом, падающим из точки P под углом i к нормали MC и под углом u к оси OC.

Обозначения: $OP = s$, $CM = r$, $HM = h$; l — величина предмета в точке P; соответствующие величины для преломленного луча i', u', s' и l'. За начало координат для отсчета отрезков принимается вершина сферы O. Углы i, i' или u, u' положительны, если при наблюдении из точки пересечения луча с нормалью MC или осью OC луч располагается вправо от них.



Фиг. 10. Преломление луча через сферу.

Преломление лучей через сферическую поверхность рассчитывается по основному уравнению нулевых лучей

$$n\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{s}\right)=n'\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{s'}\right)$$

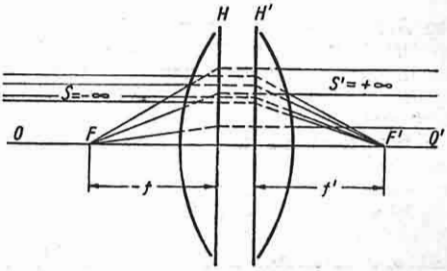
и уравнению

$$\frac{nl}{s}=\frac{n'l'}{s'},$$

или

$$n\cdot u\cdot l=n'\cdot u'\cdot l'.$$

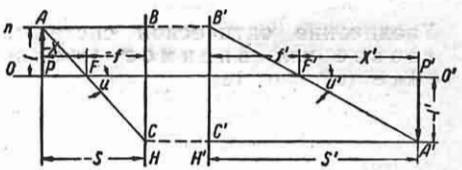
Главные плоскости и фокусы идеальной оптической системы. В идеальной оптической системе свойство параксиальной области распространено на всю систему. Пучок параллельных лучей после преломления в оптической системе из K поверхностей (фиг. 11) соберется в точке F', называемой *задним фокусом* оптической системы. Геометрическое место точек пересечения продолжений падающих параллельных лучей и соответствующих им преломленных лучей — плоскость, перпендикулярная к оптической оси и называемая *задней главной плоскостью* H' оптической системы. Аналогичные точка F и плоскость H для пространства предметов называются *передним фокусом* и *передней главной плоскостью*. Точки пересечения главных плоскостей с оптической осью — *главные точки*



Фиг. 11. Главные плоскости и фокусы оптической системы.

оптической системы. Расстояния f и f' от главных точек до соответствующих фокусов — *переднее и заднее фокусные расстояния* оптической системы. Плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно оси, — *фокальные плоскости* оптической системы.

Построение изображения в центрированной оптической системе. F, F', H и H' (фиг. 12) — фокусы и главные



Фиг. 12. Построение изображения в центрированной оптической системе.

плоскости системы из K поверхностей; l и l' — предмет и его изображение; s и s' — удаления предмета и его изображения.

Для построения изображения используются:

1) луч, идущий из точки предмета A параллельно оси и после системы в задний фокус F', и 2) луч, идущий из точки A через передний фокус F и после системы параллельно оси.

Благодаря полному подобию главных плоскостей точки прохождения лучей через главные плоскости B и B', а также C и C' равноудалены от оси. Точка A' пересечения первого и второго лучей

в пространстве изображений — изображение точки A. Аналогично строится изображение любой точки предмета.

Уравнение Ньютона

$$X \cdot X' = f \cdot f',$$

где X и X' — расстояния от фокусов до предмета и до изображения (фиг. 12), определяет положение изображения как функцию удаления предмета от переднего фокуса.

Уравнение в отрезках

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1$$

определяет положение изображения как функцию удаления предмета от главной плоскости.

В частном случае при $n' = n$ (например, система находится в воздухе) $f' = -f$. Тогда уравнение Ньютона принимает форму

$$XX' = -f'^2$$

и уравнение в отрезках

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}.$$

Увеличение оптической системы. Угловое или видимое увеличение (см. фиг. 12)

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{s}{s'}.$$

Линейное увеличение

$$\beta = \frac{ns'}{n's}.$$

Продольное увеличение — предел отношения осевого перемещения изображения к осевому перемещению предмета, когда последнее стремится к нулю:

$$\alpha = \lim_{\Delta s \to 0} \frac{\Delta s'}{\Delta s}.$$

В частном случае при $n' = n$

$$\gamma = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = \frac{\beta}{\alpha}.$$

Расчет фокусных расстояний. В оптической системе с одной поверхностью

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}; \quad f = -\frac{nr}{n' - n};$$

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$$

(последнее уравнение справедливо для любого количества поверхностей).

В системе из двух компонентов, имеющих фокусные расстояния f_1 и f_1', f_2 и f_2' и расстояние Δ между задним фокусом первого компонента и передним фокусом заднего компонента, эквивалентные фокусные расстояния равны

$$f_э' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta}; \quad f_э = \frac{f_1 f_2}{\Delta}.$$

Расстояние от задней главной плоскости второго компонента до заднего фокуса всей системы

$$X_э' = \frac{\Delta - f_2}{\Delta} f_2'.$$

Расстояние от передней главной плоскости первого компонента до переднего фокуса всей системы.

$$X_э = \frac{\Delta - f_1}{\Delta} f_1'.$$

В системе из двух тонких линз в воздухе

$$f_э' = -f_э = \frac{f_1' \cdot f_2'}{f_1' + f_2' - d},$$

где d — расстояние по оси между второй поверхностью первой линзы и первой поверхностью второй линзы.

Расстояние фокусов системы от первой и последней поверхности

$$\sigma_э' = f_э' \left(1 - \frac{d}{f_1'}\right);$$

$$\sigma_э = -f_э' \left(1 - \frac{d}{f_2'}\right).$$

Оптическая сила. Оптическая сила оптической системы — величина, обратная фокусному расстоянию

$$\varphi = \frac{1}{f'}.$$

Единица оптической силы — диоптрия, численно равная оптической силе системы с фокусным расстоянием в 1 *м*.

Оптическая сила линзы

$$\varphi = (n-1)\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right) + \frac{(n-1)^2 \cdot d_л}{n \cdot r \cdot r'},$$

где $d_л$ — толщина линзы по оси.

В частном случае при $d_л = 0$

$$\varphi = (n-1)\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right).$$

Оптическая сила системы из двух компонентов с оптическими силами φ_1 и φ_2:

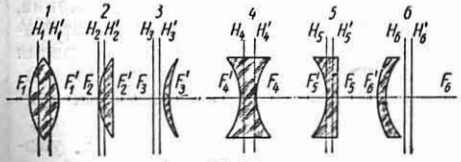
$$\varphi_э = \varphi_1 + \varphi_2 - d \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2.$$

В частном случае при $d = 0$

$$\varphi_э = \varphi_1 + \varphi_2.$$

Линзы. Линза — прозрачное тело, ограниченное двумя поверхностями, из которых по крайней мере одна — неплоская. Обычно линзы ограничиваются поверхностями вращения. Линзы характеризуются фокусным расстоянием f', кривизной, толщиной по оптической оси $d_л$, диаметром D, диаметром действующего отверстия $2a$, относительным отверстием $\frac{2a}{f'}$ и показателем преломления материала линзы n.

Типы линз (фиг. 13). *Собирательные* или положительные: двояковыпуклые (фиг. 13, *1*); плоско-выпуклые (фиг. 13, *2*); положительные мениски (фиг. 13, *3*); *рассеивающие* или отрицательные: двояко-вогнутые (фиг. 13, *4*); плоско-вогнутые (фиг. 13, *5*); отрицательные мениски (фиг. 13, *6*).



Фиг. 13. Линзы.

Положение главных плоскостей H и H' сферических линз определяется расстояниями s_H и s_H' от вершин соответствующих сфер радиусов r и r':

$$s_H = -f' \cdot d_л \frac{n-1}{r' \cdot n};$$

$$s_H' = -f' \cdot d_л \frac{n-1}{r \cdot n},$$

Ограничение световых пучков в оптических системах. Для уменьшения оптических аберраций, ограничения поля зрения и ограничения и перераспределения проходящей световой энергии в оптических системах применяются диафрагмы.

Действующая или апертурная диафрагма оптической системы это — световое отверстие, ограничивающее проходящие через систему световые пучки. Для отыскания действующей диафрагмы необходимо построить изображение всех световых отверстий системы в пространстве предметов и выбрать из них то, на изображение которого опирается наименьший телесный угол с вершиной в центре предметной плоскости. Этот телесный угол называется *апертурным углом* оптической системы и обозначается через $2u$. Изображения действующей диафрагмы в пространстве предметов и в пространстве изображений называются соответственно *входным* и *выходным зрачками* оптической системы. В выходном зрачке визуальной оптической системы помещается глаз наблюдателя. Так как диаметр диафрагмы глаза в зависимости от освещенности меняется в пределах от 2 до 8 *мм*, то для полного использования глаза целесообразно делать выходной зрачок таких оптических систем диаметром не менее 7—8 *мм*.

Диафрагма поля зрения оптической системы — световое отверстие, больше других ограничивающее поле зрения этой системы, т. е. световое отверстие, на изображение которого в пространстве предметов опирается наименьший телесный угол с вершиной в центре входного зрачка. Этот угол называется *углом поля зрения* оптической системы и обозначается через $2W$. Изображения диафрагмы поля зрения в пространствах предметов и изображений называются *входным* и *выходным окнами* оптической системы.

Виньетирование — частичное срезание какой-либо диафрагмой оптической системы пучка лучей, падающего на входной зрачок. В результате виньетирования происходит падение освещенности в части картинной плоскости.

Главные лучи оптической системы. По своему значению в определении габаритов прибора, а также

апертуры и поля зрения выделяются два луча:

1) *апертурный луч*, проходящий через центральную точку предметной плоскости и через край входного зрачка под углом u к оси системы; основное свойство апертурного луча заключается в том, что он пересекает оптическую ось в местах изображений предметной плоскости; этим свойством пользуются для установления мест размещения тех элементов, которые должны быть видны одновременно с предметом (нитей, шкал и т. д.);

2) главный, или *полевой луч*, проходящий через край поля зрения и центр входного зрачка под углом W к оси системы; главный луч проходит через центры зрачков и действующей диафрагмы и через края окон.

Разрешающая сила идеальной оптической системы. Разрешающей силой оптической системы называется минимальное линейное или угловое расстояние между двумя точками предметной плоскости, при котором они видны через оптическую систему раздельно.

Разрешающая сила микроскопа

$$\Delta l = \frac{0{,}61\lambda}{n \sin u} \text{ мм},$$

где λ — длина волны света в *мм*; n — показатель преломления среды пространства предметов; u — апертурный угол системы.

Разрешающая сила телескопической системы в секундах при $\lambda = 556$ *ммк*

$$\gamma'' = \frac{140}{2a'},$$

где $2a'$ — диаметр входного зрачка системы в *мм*.

Количество точек, разрешаемое фотообъективом,

$$N = 1{,}64 \frac{\sin u}{\lambda} \frac{1}{\text{мм}}.$$

В частном случае для бесконечно удаленного предмета при $\lambda = 556$ *ммк* разрешаемое фотообъективом количество точек

$$N = \frac{1475}{K} \frac{1}{\text{мм}}$$

и количество штрихов решетки

$$N_p = \frac{1802}{K} \frac{1}{\text{мм}},$$

где $\frac{1}{K} = \frac{D}{f'}$ — относительное отверстие объектива.

Предварительный габаритный расчет оптической системы. Расчет производится на основании теории идеальной оптической системы и в предположении, что линзы являются тонкими. В предварительном расчете призмы и зеркала заменяют воздушным слоем, длина которого равна длине хода в них осевого луча, деленной на показатель преломления их стекла. Затем, исходя из необходимого расположения оптических элементов системы, их фокусных расстояний и диаметра одной из диафрагм, рассчитывают последовательно диаметры отверстий всех элементов по уравнениям тангенсов:

$$u'_k = h_k \varphi'_k + u_k$$

и

$$h_{k+1} = h_k - d_k u'_k,$$

где $u_k = u'_{k-1}$, а величина u_1 легко определяется по формуле $u_1 = \frac{a'}{s_1}$, если принять в качестве первого отверстия входной зрачок (s_1 — расстояние от системы до предметной плоскости).

Отражательные призмы. Отражательные призмы применяются для изменения направления оптической оси прибора, оборачивания изображения, изменения направления линии визирования прибора, разделения поля зрения или светового пучка, компенсации вращения изображения в панорамных приборах и т. д.

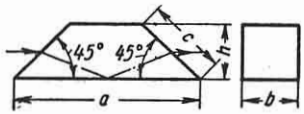
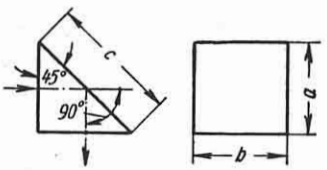
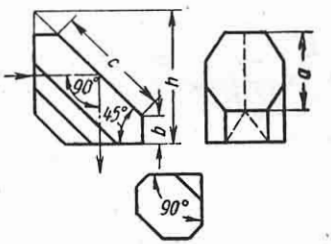
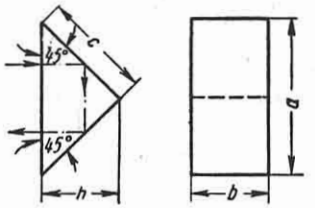
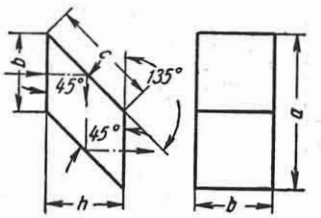
Основные данные наиболее употребительных призм приводятся в табл. 5.

В табл. 5 основные размеры призм даны в зависимости от наибольшего теоретического диаметра светового пучка D. Там же L — геометрическая длина хода луча в призме.

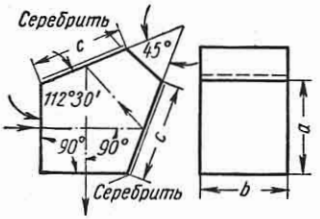
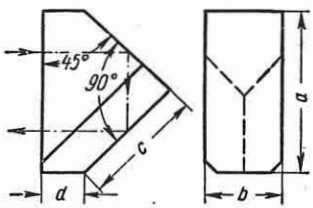
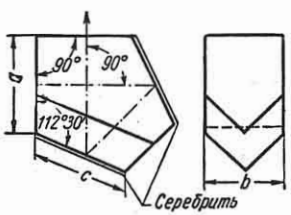
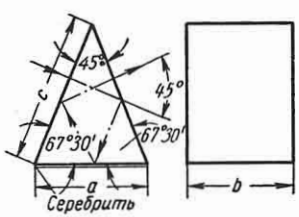
Для предохранения призм от скалывания на ребрах (кроме ребер крыш) и на вершинах трехгранных углов снимают фаски, размеры которых (с допусками) приведены в табл. 6.

Таблица 5

Основные данные отражательных призм

Наименование призмы и угол отклонения лучей	Эскиз	Основные размеры	Основные свойства и примеры применения
Прямая призма АР = 0°		$a=D\frac{2\sqrt{2n^2-1}}{\sqrt{2n^2-1}-1}$, где n — показатель преломления стекла; $b=D$; $c=1{,}414D$; $h=D$; $L=D\frac{2n}{\sqrt{2n^2-1}-1}$	При вращении призмы вокруг оптической оси изображение поворачивается в ту же сторону в 2 раза быстрее. Применяется для компенсации поворота изображения в панорамных приборах и устанавливается только в параллельных пучках
Прямоугольная призма АР = 90°		$a=D$; $b=D$; $c=1{,}414D$; $L=D$	Дает зеркальное изображение. При нормальном падении луча на входную грань $\omega=90°$. Часто применяется для изменения направления визирования путем ее поворота
Прямоугольная призма с крышей АкР = 90°		$a=D$; $b=0{,}836D$; $c=1{,}414D$; $h=1{,}732D$; $L=1{,}732D$	Применяется в качестве оборачивающей системы с отклонением оптической оси на 90°
Прямоугольная призма БР = 180°		$a=2D$; $b=D$; $c=1{,}414D$; $h=D$; $L=2D$	Дает зеркальное изображение. Смещает оптическую ось в поперечном направлении на D. Применяется в оборачивающих системах призменных биноклей
Призма-ромб БС = 0°		$a=2D$; $b=D$; $c=1{,}414D$; $h=D$; $L=2D$	Дает прямое изображение. Применяется для поперечного смещения оптической оси без изменения ее направления

Продолжение табл. 5

Наименование призмы и угол отклонения лучей	Эскиз	Основные размеры	Основные свойства и примеры применения
Пятиугольная призма (пентапризма) БП = 90°		$a = D$; $b = D$; $c = 1{,}082D$; $L = 3{,}414D$	Дает прямое изображение. Отклоняет оптическую ось на 90° независимо от угла падения луча на входную грань. Применяется в качестве концевых отражателей в оптических дальномерах
Прямоугольная призма с крышей БкР = 180°		$a = 2{,}225D$; $b = D$; $c = 1{,}414D$; $d = 0{,}366D$; $L = 2{,}957D$	Применяется в качестве оборачивающей системы с отклонением оптической оси на 180°
Пятиугольная призма с крышей БкП = 90°		$a = 1{,}237D$ $b = D$; $c = 1{,}082D$; $L = 4{,}223D$	Применяется для оборачивания изображения с отклонением оси на 90° независимо от угла падения луча на входную грань
Трехгранная призма БР = 45°		$a = 1{,}082D$ $b = D$; $c = 1{,}414D$; $L = 2{,}414D$	Применяется для получения зеркального изображения с отклонением оси на 45°

Продолжение табл. 5

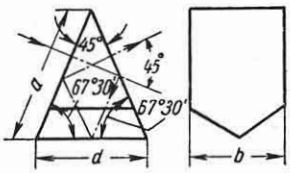
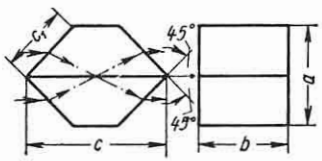
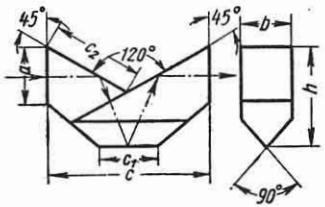
Наименование призмы и угол отклонения лучей	Эскиз	Основные размеры	Основные свойства и примеры применения
Трехгранная призма с крышей ВкР = 45°		$a = 1{,}781D$; $b = D$; $d = 1{,}363D$; $L = 3{,}04D$	Применяется для полного оборачивания изображения с отклонением оси на 45°
Призма-куб К = 0°		$a = D$; $b = D$; $c = D\frac{\sqrt{2n^2-1}}{\sqrt{2n^2-1}-1}$, $c_1 = 0{,}707D$; $L = D\frac{n}{\sqrt{2n^2-1}-1}$	Применяется в качестве визирной призмы при большом диапазоне углов визирования (до 210—220°). При полусеребренных поверхностях может применяться для перераспределения светового потока. Состоит из двух склеенных между собой прямоугольных призм, гипотенузные поверхности которых посеребрены. Устанавливается только в параллельных пучках. Дает зеркальное изображение предмета. Сложна и дорога в изготовлении
Прямая оборачивающая призма Ак = 0°		$a = D$; $b = D$; $c = 3{,}46D$; $c_1 = 1{,}155D$; $c_2 = 2D$; $h = 2D$; $L = 5{,}2D$	Применяется в качестве прямой оборачивающей системы

Таблица 6

Размеры фасок отражательных призм

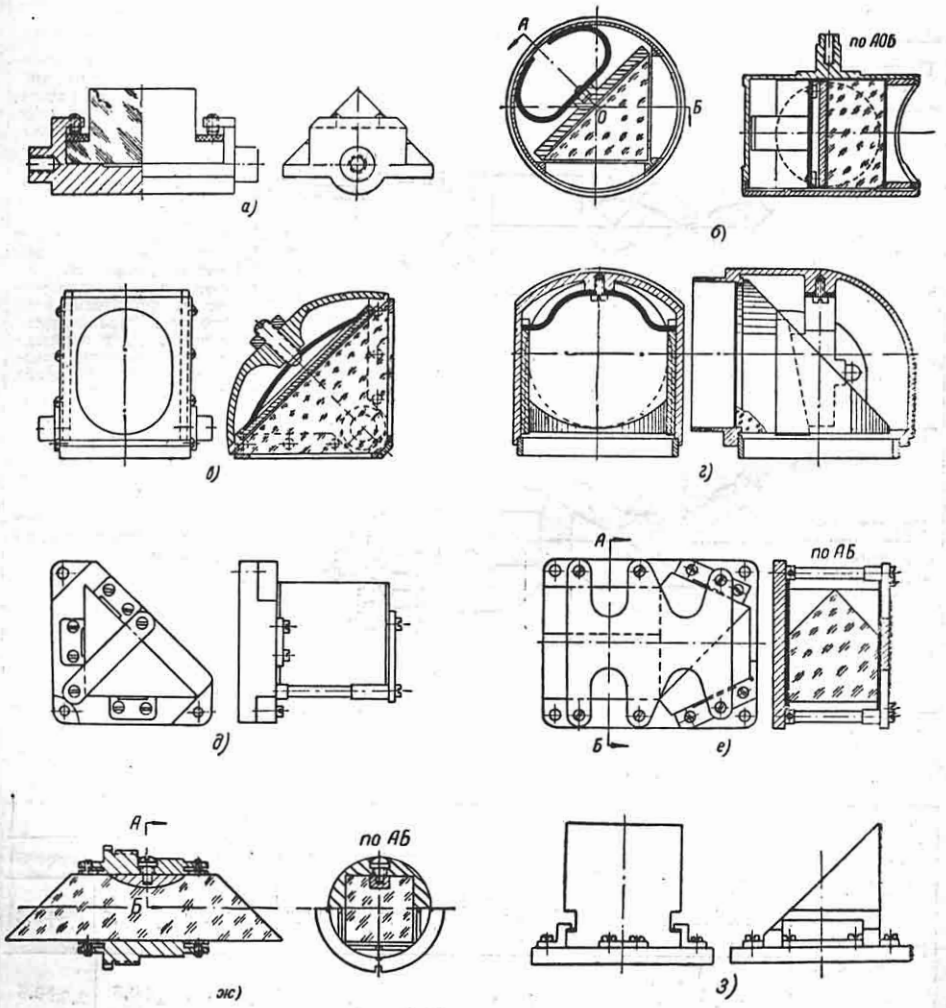
		Длина наименьшего ребра призмы в *мм*					
		0—6	6—10	10—18	18—30	30—50	Более 50
Ширина фаски в *мм*	на ребрах двугранных углов	$0{,}1^{+0{,}2}$	$0{,}2^{+0{,}2}$	$0{,}3^{+0{,}3}$	$0{,}5^{+0{,}5}$	$0{,}7^{+0{,}5}$	$1{,}0^{+0{,}5}$
	на вершинах трехгранных углов . . .	$1^{+0{,}4}$	$1^{+0{,}4}$	$1^{+0{,}4}$	$1{,}5^{+0{,}5}$	$2^{+0{,}5}$	$2{,}5^{+0{,}5}$

КРЕПЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Основные типы креплений призм: 1) установочными винтами (фиг. 14, *а*); 2) пружиной в барабане (фиг. 14, *б*); 3) пружиной с поджимным винтом (фиг. 14, *в*); 4) клиньями и пружиной (фиг. 14, *г*); 5) накладкой и планками на плате (фиг. 14, *д* и *е*); 6) шпонкой в оправе (фиг. 14, *ж*); 7) угольниками на плате (фиг. 14, *з*).

Крепление призм пружиной применяется в исключительных случаях. Поверхности деталей крепления, соприкасающиеся с полированными поверхностями призм, особенно при нежестком креплении (пружиной), должны быть тщательно отполированы. Соприкосновение деталей крепления с рабочим участком полированных поверхностей призм нежелательно, а зазор между ними должен быть достаточным, чтобы устранить возможность засасывания влаги.

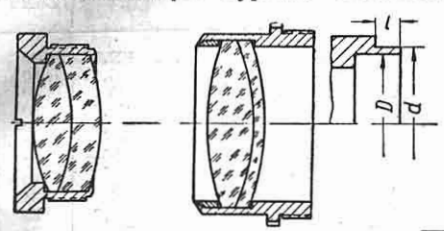
Крепление круглых оптических деталей в оправах. Крепление закаткой применяется при диаметрах



Фиг. 14. Крепление призм.

оптических деталей до 50—70 *мм* и является наиболее простым, надежным и дешевым способом.

На фиг. 15 показаны примеры крепления закаткой и заготовка оправы для закатки. Размеры буртика заготовки



Фиг. 15. Крепление линз закаткой.

указаны в табл. 7. После закатки буртик протачивается на конус до

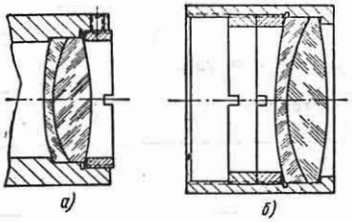
Таблица 7

Размеры буртика заготовки в *мм*

Диаметр оптической детали D	$d - D$	l
До 10	От 0,3 до 0,5	0,3—0,4
10—30		0,5—0,7
30—50		1—1,2
50—70		1,2—1,5

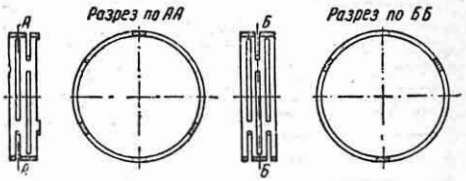
толщины стенки по краю 0,05—0,1 *мм*. Соединение — неразъемное.

Крепление зажимным кольцом (фиг. 16) применяется при диаметрах оптических деталей более 6 *мм*. Зажимное кольцо стопорится стопорным винтом (фиг. 16, *а*) или контрящим кольцом (фиг. 16, *б*). Соединение — разъем-

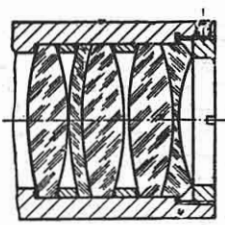


Фиг. 16. Крепление линз зажимным кольцом.

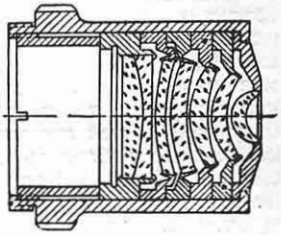
ное. В особо точных приборах и при больших диаметрах линз применяется крепление зажимным кольцом с пружинящим прокладным кольцом (фиг. 17). При креплении нескольких линз в одной оправе между ними устанавливаются жесткие прокладные кольца (фиг. 18). В микрообъективах (фиг. 19) каждая линза насыпной оптической системы крепится в особой оправе.



Фиг. 17. Крепление линз с пружинящим кольцом.

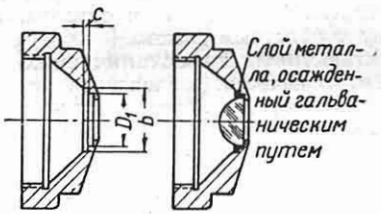


Фиг. 18. Крепление линз с прокладными кольцами.



Фиг. 19. Микрообъектив.

Крепление гальваническим способом применяется при диаметрах линз менее 5 *мм*. Крепление линзы и



Фиг. 20. Крепление линз гальваническим способом.

заготовка оправы показаны на фиг. 20. Размеры заготовки даны в табл. 8.

Таблица 8

Диаметр оптической детали D в *мм*	D_1 в *мм*	b в *мм*	c в *мм*
1—2	$D + 0{,}03$	$D + 2$	0,08—0,10
2—5	$D + 0{,}04$		0,10—0,20

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Телескопические оптические системы — линзовые афокальные (бесфокусные) оптические системы, которые составлены из двух оптических систем таким образом, что задний фокус первой системы (объектива) совпадает с передним фокусом второй системы (окуляра). Телескопические оптические системы не имеют фокусов и фокальных и главных плоскостей. Они предназначены для наблюдения удаленных предметов.

В телескопической системе Кеплера объектив и окуляр — положительные, в системе Галилея — окуляр отрицательный. Система Галилея дает прямое мнимое изображение, система Кеплера — перевернутое действительное, и для получения в ней прямого изображения необходимо добавлять оборачивающую систему. Система Кеплера может применяться в измерительных приборах. В этом случае измерительные шкалы или отсчетные индексы ставятся в задней фокальной плоскости объектива или в передней фокальной плоскости окуляра (при отсутствии линзовой оборачивающей системы эти плоскости совпадают). Увеличение телескопической системы равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра, взятому с обратным знаком.

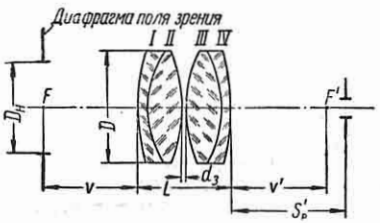
Объективы телескопических систем. В качестве объективов телескопических систем применяются обычно двух-, трех- и четырехлинзовые системы. Объективы телескопических систем характеризуются световым диаметром D, фокусным расстоянием f' и углом поля зрения $2W$. Количество существующих объективов телескопических систем чрезвычайно велико (см., например, Атлас объективов ГОИ, 1948 г.). В табл. 9 приводятся основные данные некоторых двухлинзовых серийных объективов. Угол поля зрения этих объективов лежит в пределах 8—12°.

Таблица 9

Объективы телескопических систем

Основное назначение объектива	Фокусное расстояние f' мм	Световой диаметр D мм
Бинокль 6×30 Б-6	122,94	30
Бинокль 8×30 Б-8	143,92	30
Бинокль Б-4	125	40
Стереотруба	279,37	50
Насадок к стереотрубе	264,38	60
Прибор БИ	109,8	25
Буссоль	105,75	22
Теодолит ТТ-50	253	40
Нивелир НГ	314	34
Нивелир НТ	206,3	34
Кипрегель КБ	380	34
Коллиматор К-8	60,9	40
Снайперский прицел	80	30
Панорама ПГ	79,67	18
Прибор ПО-1М	125,11	24
Прибор ШБ	58,97	23

Первый набор симметричных окуляров, применяющихся в приборах с окулярным полем зрения до 40° при значительном удалении зрачка выхода системы $s'_B = (0{,}75 \div 1{,}2)\,f'$, см. на фиг. 21 и в табл. 10.



Фиг. 21. Симметричные окуляры.

Таблица 10

Первый набор симметричных окуляров (фиг. 21)
Все размеры в *мм*

Обозначение	Фокусное расстояние f'	Вершинные фокусные расстояния		Диаметр диафрагмы поля зрения D_H	Перемещение окуляра на одну диоптрию	Габаритные размеры		
		переднее v	заднее v'			Общая длина L	Световой диаметр D	Расстояние между линзами d_3
1С-F20	20,00	−14,9	14,9	14,5	0,40	15,1	17,5	0,1
1С-F25	25,00	−18,9	18,9	18,0	0,63	18,1	22,0	0,1
1С-F30	29,97	−22,8	22,8	22,0	0,90	21,2	26,0	0,2
1С-F35	34,95	−26,4	26,4	25,5	1,23	25,2	30,5	0,2
1С-F40	40,01	−30,5	30,5	29,0	1,60	28,2	34,5	0,2
1С-F50	49,95	−37,9	37,9	36,5	2,50	35,5	43,5	0,5

Первый набор ахроматических двухлинзовых окуляров, применяющихся в приборах с окулярным полем зрения до 50° при небольшом удалении зрачка выхода системы $s'_B = (0{,}4 \div 0{,}7)\,f'$, см. на фиг. 22 и в табл. 11. Здесь действующее поле зрения окуляра при наблюдении сетки — не свыше 44°.

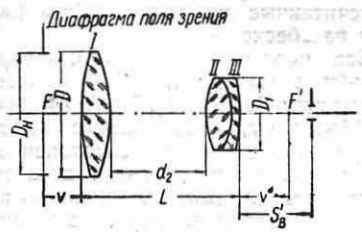
Первый набор окуляров с удаленным зрачком, применяющихся в приборах с окулярным полем зрения до 50° при большом удалении зрачка выхода системы $s'_B = (0{,}9 \div 1{,}25)\,f'$, см. на фиг. 23 и в табл. 12.

Окуляры широкого поля зрения, применяющиеся в приборах с окулярным полем зрения 60—65°

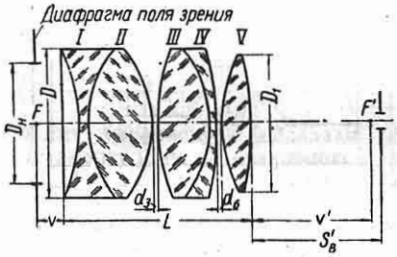
Таблица 11

Первый набор ахроматических двухлинзовых окуляров (фиг. 22)
Все размеры в *мм*

Обозначение	Фокусное расстояние f'	Вершинные фокусные расстояния		Диаметр диафрагмы поля зрения D_H	Перемещение окуляра на одну диоптрию	Габаритные размеры			
		переднее v	заднее v'			Общая длина L	Световые диаметры		Расстояние между линзами d_2
							D	D_1	
1К-F20	20,04	— 5,8	7,3	19,0	0,40	25,0	19,5	11,2	14,5
1К-F25	24,90	— 7,4	9,0	23,5	0,63	31,0	24,5	14,0	18,0
1К-F30	29,99	— 8,9	11,5	28,0	0,90	36,5	30,0	17,0	21,5
1К-F35	34,92	—10,8	13,4	32,5	1,22	42,0	34,0	20,0	25,0
1К-F40	40,01	—12,2	15,2	37,5	1,60	48,0	39,0	22,5	29,0
1К-F50	49,95	—14,9	19,4	47,0	2,50	60,0	49,0	28,0	36,0



Фиг. 22. Двухлинзовые ахроматические окуляры.



Фиг. 23. Окуляры с удаленным зрачком.

Таблица 12

Первый набор окуляров с удаленным зрачком (фиг. 23)
Все размеры в *мм*

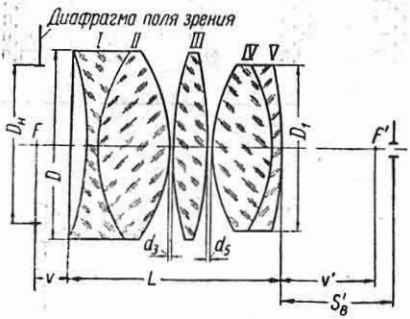
Обозначение	Фокусное расстояние f'	Вершинные фокусные расстояния		Диаметр диафрагмы поля зрения D_H	Перемещение окуляра на одну диоптрию	Габаритные размеры				
		переднее v	заднее v'			Общая длина L	Световые диаметры		Расстояние между линзами	
							D	D_1	d_2	d_3
IV-F20	19,99	— 6,3	18,4	19,0	0,40	27,9	23,0	21,0	0,2	0,2
IV-F25	24,96	— 7,8	22,6	23,5	0,63	35,4	28,6	26,2	0,2	0,2
IV-F30	29,98	— 9,6	27,5	28,0	0,90	41,6	34,5	31,5	0,3	0,3
IV-F35	34,95	—11,5	32,1	32,5	1,23	47,6	40,0	37,0	0,3	0,3
IV-F40	40,07	—13,9	37,1	37,5	1,60	52,3	46,0	42,0	0,4	0,4
IV-F45	49,97	—16,8	45,5	47,0	2,50	67,5	57,5	52,5	0,5	0,5

Таблица 13

Окуляры широкого поля зрения (фиг. 24)
Все размеры в *мм*

Обозначение	Фокусное расстояние f'	Вершинные фокусные расстояния		Диаметр диафрагмы поля зрения D_H	Перемещение окуляра на одну диоптрию	Габаритные размеры				
		переднее v	заднее v'			Общая длина L	Световые диаметры		Расстояние между линзами	
							D	D_1	d_3	d_5
Э-F20	19,80	— 6,1	13,5	25,5	0,40	33,9	29,0	26,0	0,2	0,2
Э-F25	25,00	— 8,9	17,0	30,5	0,63	40,4	36,5	32,5	0,25	0,25
Э-F30	29,96	—10,6	21,4	36,5	0,90	47,0	44,0	39,0	0,3	0,3
Э-F35	34,90	—12,4	25,3	43,0	1,23	54,3	51,0	45,5	0,4	0,4
Э-F40	39,75	—13,3	28,6	49,0	1,60	63,4	58,5	52,0	0,4	0,4
Э-F50	49,82	—18,6	36,8	61,0	2,50	74,5	73,0	65,0	0,5	0,5

при удалении зрачка выхода системы $s'_B = (0{,}7 \div 0{,}9)\,f'$, см. на фиг. 24 и в табл. 13.



Фиг. 24. Окуляры широкого поля зрения.

Микроскопы — оптические системы, у которых передний фокус положительного окуляра удален от заднего фокуса положительного объектива. Предмет помещается непосредственно перед передним фокусом объектива. Микроскоп дает обратное увеличенное изображение. Общее увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра.

Объективы для микроскопов и микрофотографии. Микрообъективы подразделяются на ахроматы, полуапохроматы и апохроматы соответственно степени совершенства коррекции. Ахроматы и апохроматы изготовляются сухие и иммерсионные. Последние имеют более высокую апертуру (до 1,7—1,8), что повышает разрешающую способность микроскопов, и менее чувствительны к изменениям толщины покровного стекла.

Нормальные объективы рассчитаны на длину тубуса 160 *мм* (длиной тубуса называется расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра микроскопа.) Для работы в отраженном свете с объектами, не покрытыми покровными стеклами, служат специально корригированные объективы, рассчитанные на длину тубуса 190 *мм* или на „бесконечность".

Все объективы имеют стандартную резьбу с шагом 0,705 *мм* и внешним диаметром 20,28 *мм* (ГОСТ 3469-46).

Объективы, рассчитанные на длину тубуса 190 *мм* и на „бесконечность", снабжены, кроме резьбы, посадочным цилиндром, дающим возможность вставлять их сверху в тубус, не ввинчивая в резьбу. На оправе объектива указываются увеличение, числовая апертура, длина тубуса (длина тубуса 160 *мм* не указывается).

Ахроматические объективы дают изображение объектов, в котором совпадают изображения средних красок спектра как по месту, так и по увеличению. Ахроматы (табл. 14) перекорригированы в части сферической аберрации для слабых голубых лучей и недокорригированы для красных лучей. Изображения, даваемые этими лучами, не совпадают с изображениями, даваемыми средними участками спектра, что следует иметь в виду при выборе источника освещения и при установке на резкость. Они являются наиболее простыми и дешевыми объективами. Слабые и средние ахроматы используются

Таблица 14

Технические данные ахроматов

Собственное увеличение	Числовая апертура	Фокусное расстояние в *мм*	Длина тубуса в *мм*	Свободное расстояние в *мм*	Характер объекта	Шифр	Примечание
1	0,03	33,45	160	30,4	Объект покрыт покровным стеклом толщиной 0,17—0,20 *мм*	ОМ-30	
3,7	0,11	33,1	160	27,7		ОМ-12	
8	0,20	18,9	160	9,0		М-42	
20	0,40	8,4	160	1,91		ОМ-11а	
40	0,65	4,4	160	0,6		М-Ш	
60	0,85	3,1	160	0,43		ОМ-7	
90	1,25	1,96	160	0,15		М-101	С масляной иммерсией
4,7	0,11	33,1	190	25,9	Объект без покровного стекла	ОМ-12а	
9	0,20	18,9	190	8,7		ОМ-13	
21	0,45	8,4	190	1,9		ОМ- 8	
40	0,65	4,59	190	0,66		ОМ- 9	
95	1,25	1,96	190	0,11		ОМ-10	С масляной иммерсией
11	0,17	23,0	„Бесконечность“	7,7	Объект без покровного стекла	ОС-31	Только для металломикроскопов
40	0,65	6,3		0,85		ОС-34	
90	1,25	2,7		0,22		ОС-35	
10	0,14	25,0		24,0		ОС-39	Подогнаны по высоте
18	0,30	13,89		5,71		ОС-40	
33	0,37	8,16		2,78		ОС-41	
54	0,67	4,25		0,76		ОС-42	
10	0,25	15,3		6,5		03Б	Флюоритовый Для звукового блока киноустановок

с окулярами Гюйгенса. При сильных объективах лучше применять компенсационные окуляры.

Апохроматические объективы. Апохроматы (табл. 15) применяются для исследований, при которых нужно сохранить тончайшие оттенки красок и структуры, так как их хроматическая коррекция выше, чем у ахроматов и полуапохроматов. Апохроматы имеют еще то преимущество, что при меньших увеличениях обладают бóльшими апертурами по сравнению с ахроматами. Благодаря этому можно получить бóльшие полезные увеличения. Они применяются в паре с компенсационными окулярами в металломикроскопах.

Полуапохроматические объективы отличаются от ахроматов применением флюорита для части линз, что позволяет улучшить хроматическую коррекцию.

Таблица 15

Технические данные апохроматов

Собственное увеличение	Числовая апертура	Фокусное расстояние в *мм*	Длина тубуса в *мм*	Свободное расстояние в *мм*	Характер объекта	Шифр	Примечание
15	0,30	15,7	„Бесконечность“	4,9	Объект без покровного стекла	ОС-23	
30	0,65	8,37		0,87		ОС-24	
60	0,95	4,30		0,22		ОС-25	Только для светлого поля
90	1,00	2,80		0,55		ОС-36	Для темного поля; масляная иммерсия
90	1,30	2,80		0,23		ОС-29	Только для светлого поля; масляная иммерсия

Применяются полуапохроматы безиммерсионные 40×0,85; 60×0,90 и 90×0,90, а также иммерсионные 100×1,30.

Объективы для ультрафиолетовых лучей позволяют за счет применения лучей с короткими длинами волн повысить разрешающую способность микроскопов примерно в 2 раза. Поэтому они применяются для фотографирования увеличенных изображений препаратов.

Кварцевые объективы (табл. 16).

Зеркально-линзовые объективы, состоящие из кварцевых и флюоритовых линз и зеркал, хорошо исправлены на хроматизм и могут быть рассчитаны для работы в широкой области видимых и ультрафиолетовых лучей; это весьма удобно для микрофотографирования в ультрафиолетовых лучах вследствие простоты установки светочувствительного слоя после фокусировки изображения в видимых лучах.

Таблица 16

Технические данные кварцевых объективов

Числовая апертура	Безиммерсионные		С глицериновой иммерсией	
	0,20	0,35	0,8	1,25
Фокусное расстояние в *мм*	16	6	2,5	1,7

Применяются объективы 65×0,8 с глицериновой иммерсией и 40×0,5 для видимых и ультрафиолетовых лучей, а также объектив 90×1,20 с однородной иммерсией для видимых лучей, дающий плоское изображение и хорошо ахроматизированный.

Окуляры микроскопов. Окуляры микроскопов обычно смонтированы в трубке с наружным диаметром 23,2 *мм*. Существуют окуляры нескольких типов, предназначенных для различных целей.

Окуляры Гюйгенса (табл. 17) применяются с ахроматическими и флюоритовыми объективами, главным образом для визуального наблюдения. Они работают как лупа, увеличивая действительное изображение, даваемое объективом.

Ортоскопические окуляры АМ-19 с собственным увеличением 17×, фокусным расстоянием 15 *мм* и диаметром поля зрения 13,6 *мм* применяются главным образом для измерительных целей.

Ортоскопические окуляры удобны тем, что полевая диафрагма расположена перед коллективной линзой и изображение, даваемое объективом, попадает в полость диафрагмы окуляра, не будучи измененным коллективной линзой, как это имеет место в окулярах Гюйгенса. При этом не изменяется масштаб изображения, даваемого объективом, что особенно удобно для измерительных целей.

Компенсационные окуляры (табл. 18) полностью устраняют появление цветных каемок на краю поля, что имеет место при рассматривании объекта, освещенного белым светом, с помощью окуляров Гюйгенса или ортоскопических.

Симметричные окуляры имеют удаленный выходной зрачок, широкое поле зрения и полевую диафрагму перед линзами. Применяются для фотографирования при слабых увеличениях. Выпускается окуляр с собственным увеличением 15× и фокусным расстоянием 17 *мм*.

Таблица 17

Технические данные окуляров Гюйгенса

Собственное увеличение	Фокусное расстояние в *мм*	Диаметр поля зрения в *мм*	Шифр	Примечание
4	62,8	24	АМ-6	Широкоугольный
4	62,8	20	АМ-30	С удаленным выходным зрачком
5	50,6	23	АМ-21	Широкоугольный с крестом нитей; посадочный диаметр 30 *мм*; для большой модели поляризационного микроскопа
7	35,9	18	ГМ-7	С удаленным выходным зрачком
7	36	18	М-7	
8	31,4	21	АМ-23	Широкоугольный, с сеткой и шкалой; посадочный диаметр 30 *мм*; для большой модели поляризационного микроскопа
10	25,2	14	М-10	
15	16,8	8	М-11	

Таблица 18

Технические данные компенсационных окуляров

Собственное увеличение	Фокусное расстояние в *мм*	Диаметр поля зрения в *мм*	Шифр	Примечание
3	83,0	20	АМ-25	С удаленным выходным зрачком
5	50,0	20	АМ-24	
7	36,0	18	АМ-26	
10	25,2	13	АМ-14	
15	16,8	12	АМ-15	
20	12,6	9	АМ-16	

Окуляры Кельнера имеют широкое поле зрения и полевую диафрагму перед коллективной линзой.

Выпускается окуляр с собственным увеличением 7× и фокусным расстоянием 36 *мм*.

Окуляры Гомали (табл. 19) имеют отрицательные фокусные расстояния и выходной зрачок, лежащий внутри системы. Предназначены только для микрофотографии, где они в сочетании с апохроматами дают безупречные и особо плоские изображения.

Таблица 19

Технические данные окуляров Гомали

Фокусное расстояние в *мм*	Диаметр поля зрения в *мм*	Шифр	Примечание
70	15	ОН-6	Применяются с объективами-апохроматами с апертурами от 0,30 до 0,65
28	28	ОН-7	
36,4	13	ОН-8	Применяются с иммерсионными объективами с апертурами свыше 1,0

Винтовой окуляр-микрометр АМ-9 служит для линейных измерений в поле зрения при микроскопических исследованиях. Имеет неподвижную сетку и подвижную с расходом 8 *мм*. Отсчет производится по миллиметровой шкале в поле зрения и шкале микрометрического барабана с ценой деления 0,01 *мм*. Тип Гюйгенса. Увеличение 10×.

Фотообъективы. Фотообъективы (табл. 20 и 21) широко применяются в машиностроении для получения на светочувствительном слое пленки, пластинки или бумаги различных регистрирующих устройств проективных изображений пространства или плоских предметов, а также в различных оптических контрольных приборах.

Фотообъективы характеризуются фокусным расстоянием f', относительным отверстием $\frac{1}{K}=\frac{D}{f'}$ и полем зрения. Так как фотообъективы не имеют диафрагмы поля зрения, то обычно для характеристики их поля зрения указывают тот диаметр круга на светочувствительном слое, внутри которого качество изображения удовлетворительно, или угол с вершиной во второй главной точке объектива, опирающийся на этот круг.

Наиболее широко применяются универсальные фотообъективы $\left(\frac{1}{K}=\frac{1}{7}\div\frac{1}{2,5}\right.$, поле зрения 50—60°).

Широкоугольные фотообъективы (поле зрения больше 70°) применяются главным образом в аэрофотоаппаратах.

Светосильные фотообъективы $\left(\frac{1}{K}>\right.$ $\left.>\frac{1}{3,5}\right)$ применяются при съемке быстродвижущихся объектов или при недостаточной освещенности.

Телеобъективы $\left(\frac{1}{K}<\frac{1}{4,5}\right.$, поле зрения до 30°) применяются для фотосъемки удаленных объектов в крупном масштабе.

При выборе фотообъективов обычно исходят из того, чтобы фокусное расстояние было не меньше диагонали фотопластинки.

В табл. 21 приводятся основные данные некоторых других фотообъективов.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Фотокамеры и киносъемочные камеры. Технические данные фотокамер приведены в табл. 22 и 23.

Штативные фотокамеры предназначены для специальной качественной съемки различных объектов с небольших расстояний с естественным или искусственным освещением, а также для репродукционных работ. Камеры допускают применение тяжелых длиннофокусных объективов и снабжены устройствами для раздельных вертикальных и горизонтальных перемещений объектива и кассетной части.

Таблица 20

Технические данные наиболее употребительных фотообъективов

Наименование	Относительное отверстие	Фокусное расстояние в *мм*	Поле зрения	Разрешающая сила в линиях на *мм*		Дистанция съемки	Шкала диафрагмы	Оправа		Основное назначение	
				в центре поля	на краю поля			длина в *мм*	наибольший диаметр в *мм*		
Юпитер 3 ЗК-50/1,5	1 : 1,5	50	45°	30	18	К аппарату „Киев"	1,5—22	43	46	К фотоаппаратам „Киев", „Зоркий", „Зенит"*	Светосильный
Юпитер 8, Ф 1:2, ЗК-50/2	1 : 2	50	45°	32	18	От 0,9 *м* до ∞	2—22	38	46		Нормальный
Юпитер 9, ЗК-85	1 : 2	85	29°	30	15	К аппарату „Зоркий"	2—22	70	62		Портретный
Юпитер 11, ЗК-135	1 : 4	135	18°	34	18	От 1 *м* до ∞	4—22	93	58		Телеобъектив
Юпитер 12, БК-35	1 : 2,8	35	63°	34	15		2,8—22	50	58		Широкоугольный
И-22	1 : 3,5	50	45°	32	20	От 1 *м* до ∞	3,5—16	47	45	К фотоаппаратам типа „Зоркий", „Зенит" и увеличителям РУ-1 и У2**	
И-23, И-23У	1 : 4,5	110	52°	28	14	От 1,5 *м* до ∞	4,5—32	33	60	К фотоаппаратам типа „Москва" и увеличителям У-4 и „Фотам"**	
И-51	1 : 4,5	210	56°	32	8	От 0,4 *м* до ∞	4,5—32	60	90	К камере ФК13×18	
И-13	1 : 4,5	300	56°	24	8	От 0,6 *м* до ∞	4,5—32	75	100	К камере ФК18×24	
Т-21	1 : 6,3	80	55°	28	12	От 1,5 *м* до ∞	6,3—11	35	65	К фотоаппарату „Комсомолец"	
И-11	1 : 9	300 450 600 900 1200	45°	35	14	От 0,6; 0,9; 1,2; 1,8; 2,4; до ∞	9—32	76 98 121 190 230	42 59,5 79 114 117,5	Для ответственных съемок оригиналов и репродукции в целях фотомеханического размножения	
И-10	1 : 3,5	50	47°	40	Низкая		3,5—16	45	45	К фотоаппарату типа ФЭД	Нормальный
ФЭД с	1 : 2	50	47°	25	11	От 1 *м*	2—18	45	45		Светосильный
ФЭД ш	1 : 4,5	28	76°	42	15	до ∞	4,5—18	45	45		Широкоугольный
ФЭД т	1 : 6,3	100	24°	40	25		6,3—18	45	45		Телеобъектив
И-7	1 : 3,5	105	55°	28	14	От 1 *м* до ∞	3,5—22	35	65	К фотоаппаратам „Турист", „Репортер"	
Т-22	1 : 4,5	75	60°	28	12			35	65	К фотоаппарату „Любитель"	
„Ортагоз"	1 : 4,5	135	58°	30	14			35	65	К фотоаппарату „Фотокор 1"	

* К ф. „Киев" — со штыковым креплением. Остальные с резьбовым креплением. Просветленные.
** Просветленные.

Таблица 21

Наименование	Лиар 6	Руссар 25	ТФ-51	Т-2	И-17	И-2	Луч 175	Луч 180	РО4-1	РО3-3	РО2-2	Ортотеляр+ Х1	И-4
Относительное отверстие	1:5,4	1:6,3	1 : 5	1:6,3	1 : 5	1 :4,5	1 :6,3	1 :6,8	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1:6,3	1 : 4,5
Фокусное расстояние в *мм*	100	100	600	750	500	135	175	180	35	50	75	135	210

Примечание. Поле зрения объективов Лиар-6 и Руссар-25 равно 105—110°.

Киносъемочные камеры. Технические данные киносъемочных камер приведены в табл. 24 и 25.

КС-50 — для съемки на 35-*мм* пленку. Бобина на 30 *м*.

ПСК-21 — для комбинированных мультипликационных и нормальных съемок на 35-*мм* пленку со штатива с последующим озвучиванием. Снабжен шестью кассетами и светофильтрами ЖС-16 и ОС-12. Может переключаться на скорость съемки 122 кадр/сек.

Таблица 22

Пленочные фотокамеры

Наименование	Характеристика								
	Размер снимка в *мм*	Количество снимков в кассете	Объектив	Затвор	Экспозиции	Наводка на резкость	Габарит в *мм*	Вес в *Г*	Примечание
Киев, Киев III (снабжен фотоэлектрическим экспонометром)	24×36	36	Ф1 : 2 3К-50/1,5 3К-50/2 3К-85 БК-35 3К-135 Юпитер 3, 8, 9, 11, 12	Шторный с автоспуском	От 1/2 до 1/1250 сек.	Оптический дальномер с полем, созмещенным с видоискателем	150×85×83,5	750	Лучшая пленочная камера с объективами высокой разрешающей способности. Может быть рекомендована для высокоточной съемки быстротекущих процессов
ФЭД	24×36	36	И-10	Шторный	От 1/20 до 1/500 сек.	Оптический дальномер	135×70×70	580	Портативны, легки и сравнительно дешевы. Могут быть применены для технической съемки с последующим увеличением
Зоркий	24×36	36	И-22	Шторный	От 1/20 до 1/500 сек.	Оптический дальномер	135×70×75	580—605	
Зоркий 3	24×36	36	Юпитер-8	Шторный	От 1/25 до 1/1000 сек.	Оптический дальномер с полем, совмещенным с видоискателем	135×70×75	580—605	

Продолжение табл. 22

Наименование	Характеристика								
	Размер снимка в *мм*	Количество снимков в кассете	Объектив	Затвор	Экспозиции	Наводка на резкость	Габарит в *мм*	Вес в *Г*	Примечание
Зенит	24×36	36	И-22	Шторный	От 1/25 до 1/500 сек.	По изображению на матовом стекле через окуляр с 4× увеличением	138×90×78	760	Для съемки с близких дистанций от 0,15 *м* мелких деталей, для снимков с микроскопом и телескопом и для репродукции. Лучшая, малогабаритная зеркальная фотокамера с прямым изображением
Мосива 1	60×90	8	И-23	Центральный трехлепестковый	От 1 до 1/250 сек.	По шкале дистанций Оптический дальномер	165×118×130	750	Могут быть применены для технических снимков без необходимости последующего увеличения
Москва 2									
Москва 3							165×125×130	890	
Комсомолец	60×60	12	Т-21		От 1/25 до 1/100 сек.	По шкале дистанций	90×90×135	550	

Таблица 23

Технические данные штативных камер

Характеристика	Камера	
	ФК1 3×18	ФК18×24
Объектив	И-51	И-13
Кассеты	Деревянные полушторные, могут работать с вкладышами для пластинок меньшего размера	
Штатив	Деревянный трехколенный	
Высота штатива	0,64—1,64 *м*	
Камера	Квадратная с двойным растяжением	
Наводка на резкость	По матовому стеклу перемещением кассетной части с помощью кремальеры	

Длина пленки 15—30 *м*. Продолжительность транспортирования пленки 1,5—2,5 сек. Объектив типа „Гелиос", $f' = 50$ *мм*, $\frac{1}{k} = \frac{1}{2}$, просветленный. Электродвигатель — универсальный. Напряжение от 30 до 127 *в* при переменном токе и от 10 до 120 *в* при постоянном. Габариты 320×273×354 *мм*.

Фотоувеличители. Технические данные фотоувеличителей приведены в табл. 26.

Проекционный аппарат Д-1 — для чтения и демонстрирования снятых

Таблица 24

Технические данные киносъемочных камер

Характеристика	Наименование					
	КС-50	ПСК-21				
Фокусное расстояние объективов	35, 50, 75	Ж-21 28	Ж-22 35	Ж-23 50	Ж-24 75	Ж-25 100
Относительное отверстие объективов	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1 : 2
Разрешающая сила объективов в *лин/мм*:						
в центре поля	30	30	30	30	30	30
на краю поля	23	15	15	15	15	15
Скорость съемки в кадр/сек	8, 12, 16, 24, 32	От 10 до 28				
Привод	Пружинный на 16,7 *м* пленки	Электродвигатели 127/220 *в* трехфазного переменного тока и 24 *в* постоянного тока				
Дистанции съемки	⩾1 *м*	⩾1 *м*				

Таблица 25

Кинокамера СКС-1 для скоростной съемки

Характеристика	При съемке от 150 до 4000 кадр/сек	При съемке от 300 до 8000 кадр/сек
Кинопленка	Стандартная 16-*мм* в 16-*мм* камере	Специальная 16-*мм* в 8-*мм* камере
Размер кадра	7,5×10,4 *мм*	3,75×5,1 *мм*
Экспозиции	1 : 20 000 при 4000 кадр/сек	1 : 50 000 при 8000 кадр/сек

Таблица 26

Фотоувеличители

Характеристика	Наименование			
	У-2	У-4	РУ-4	„Фотам"
Увеличение	2,5×—7×	1,5×—3,2×	2,5×—8,5×	1,5×—4×
Объектив	И-22	И-23	И-22	И-23У
Размер оригиналов	24×36 *мм*	6×9; 6×6; 4,5×6 *см*	При увеличении 24×36 *см*. При репродукции от 6×9 до 20×30 *мм*	6×9; 6×6; 4,5×6 *см*
Источник освещения от сети 127/220 *в*	Эл. лампа 96 *вт*	Эл. лампа 150 *вт*	Эл. лампа 60—100 *вт*	

Примечание. Увеличитель „Фотам" при дополнении проектором типа „Фотак" обеспечивает 2,5×—10× увеличение с пленки 24×36 *мм*.

на 35-*мм* пленку текстов, схем, чертежей, фото и т. д. Размер матового экрана в аппарате 360×300 *мм*. Размер стенного экрана 2×1,32 *м*, его удаление 2,8 *м*.

Увеличение на матовом экране 10× и на стенном до 55×. Освещается кинолампой 12 *в*, 50 *вт*. Питание 127/220 *в* переменного тока.

Эпидиаскоп ЭД-1 обеспечивает эпипроекцию оригиналов до 14×14 *см* с увеличением 2,5 *L* (*L* — расстояние до экрана в *м*) и диапроекцию с диапозитивов 8,5×8,5 и 6×4 *см*.

Оптические измерительные приборы. Технические данные наиболее распространенных в машиностроении оптических приборов приведены в табл. 27, данные о лупах — в табл. 28.

Таблица 27

Технические данные оптических измерительных приборов

Наименование	Основное назначение	Пределы измерений	Точность отсчета	Увеличение крат	Габариты в *мм*	Примечание
Отсчетный микроскоп МИР-1	Измерение малых линейных величин	10 *мм*	0,1 *мм*	25	Длина 150 Диаметр 37	Бесштативная модель
Винтовой окулярмикрометр АМ-9	Линейные измерения при микроскопических исследованиях	0—8 *мм*	0,01 *мм*	10	75×90×35	Вставляется, как окуляр, в тубус микроскопа
Большой инструментальный микроскоп БМИ	Исследование резьб, фрез, кулачков, шаблонов	150×50 *мм* в поле зрения 19,5—3,9 *мм*	Линейная 0,005 *мм*, угловая 1 мин.	8,1—45,5	600×800×900	Обеспечивает наблюдение и фотографирование
Инструментальный микроскоп ИТ	Измерение резьб, режущего инструмента, линейных размеров	75×25 *мм* в поле зрения 6 *мм*	Линейная 0,005—0,01 *мм*, угловая 2—3 мин.	27,3	450×475×430	
Универсальный измерительный микроскоп УИМ-21	Измерение длин и углов, исследование фасонных деталей	Линейные 200×100 *мм*, угловые 360°, в поле зрения 5,4 *мм*	Линейная 0,001 *мм*, угловая 1 мин.	30	1130×1030×800	Рассчитан на работу в сухом, чистом помещении, при 20° С, на твердом фундаменте
Большой проектор БП	Быстрое и точное исследование плоских и объемных деталей	150×50×100 *мм* в поле зрения 60, 30 и 12 *мм*	Линейная 0,005 *мм*, угловая 3 мин.	10, 20 и 50	2100×1200×900	Не требует высокой квалификации контролера
Оптическая делительная головка ОДГ	Деление деталей на любые части по окружности	Высота центров 130 *мм*	При измерении 20″, при фрезеровании и сверлении 30″	60	Головка 340×400×390 Бабка 150×250×140	Поворот оси шпинделя в вертикальной плоскости до 90°
Оптиметр на вертикальном штативе ИКВ	Измерение наружных размеров деталей в лабораториях	Длина 180 *мм* Диаметр 150 *мм*	0,0003 *мм*	12,5	760×340×240	Имеют проекционную насадку ПН-6 для проектирования шкалы на экран диаметром 45 *мм*
Оптиметр на горизонтальном штативе ИКГ	Измерение наружных и внутренних размеров в лабораториях	Наружный диаметр до 350 *мм* Внутренний диаметр 13,5—150 *мм*	0,0003 *мм*	12,5	300×875×340	

Наименование	Основное назначение	Пределы измерений	Точность отсчета	Увеличение крат	Габариты в *мм*	Примечание
Кольцевой сферометр ИЗС-46	Измерение радиусов сферических поверхностей	—	0,001 *мм*	15	250×200×360	
Вертикальный компаратор ИЗВ-1	Технические измерения наружных размеров	До 100 *мм* — абсолютным методом, свыше 100 до 200 *мм* — методом сравнения	0,001 *мм*	62,5	875×240×240	Линейное поле зрения 2,3 *мм*
Горизонтальный компаратор ИЗА-2	Измерение штриховых мер, линеек, сеток спектрограмм	0—200 *мм*	0,001 *мм*	Визирного микроскопа 7—10,5	300×610×390	Отсчетный микроскоп имеет увеличение 61,5× Температурный режим 20° С
Микроинтерферометр Линника ИЗК-6	Исследование качества поверхностей (царапины, впадины, выступы)	В зависимости от устройства микроскопа	0,025 *мк*	Объектив ахромат 7×	150×200×350	Ввертывается в тубус микроскопа на место объектива
Двойной микроскоп по Линнику МИС-11	Исследование качества плоских и цилиндрических наружных поверхностей	Высота измеряемого профиля 0,9—60 *мк* Ход столика 10 *мм* в каждом направлении	0,01 *мм*	54, 97, 165, 318	300×275×440	Построен на принципе „светового сечения поверхности“
Профилограф по Левину ИЗП-5	Исследование профиля поверхностей глубиной от 1 *мк* и выше	0,35—7 *мм* Охватывает все классы чистоты по ГОСТ	0,1—0,2 *мк*	Вертикальное от 500 до 16 000 Горизонтальное от 25 до 500	Большая модель	Обеспечивает фотозапись микрогеометрии
Профилограф по Левину ИЗП-17	Исследование профиля поверхности в цеховых условиях	1,5 и 3 *мм* Охватывает 1—12-й классы чистоты по ГОСТ	0,1—0,2 *мк*	Вертикальное от 250 до 5000 Горизонтальное от 25 до 50	405×330×255	Обеспечивает фотозапись микрогеометрии
Горизонтальный металлографический микроскоп МИМ-3	Изучение микроструктуры металлов	Перемещение столика 15×15 *мм* Формат столика 13×18 *см*	Перемещение столика 0,1 *мм*	От 33× до 1800×	1200×800×500	Обеспечивает наблюдение и фотосъемку объектов в светлом и темном поле, а также в поляризованном свете

Продолжение табл. 27

Наименование	Основное назначение	Пределы измерений	Точность отсчета	Увеличение крат	Габариты в *мм*	Примечание
Вертикальный металлографический микроскоп МИМ-5	Изучение микроструктуры металлов	Формат снимка 9×12 *см*	—	При наблюдении до 1425× При фотосъемке до 2000×	375×515×600	Иммерсионный объектив 95×, компенсационные окуляры 7× и 10× и поляризационные светофильтры поставляются по спец. заказу
Микроскоп Бринеля МБ-2	Измерение отпечатков при испытании на твердость на прессе Бринеля	Линейное поле зрения 9 *мм* Шкала до 6,5 *мм*	0,1 *мм*	24×	180×240; диаметр 45	К прибору прилагается таблица для определения твердости по диаметру отпечатка
Прибор для определения микротвердости ПМТ-2	Нанесение микроотпечатков методом вдавливания и их измерение	Нагрузка на индентор при вдавливании 2—200 *г*	0,01 *мм*	80× и 400×	160×225×375	Для освещения снабжается опак-иллюминатором ОИ
Опак-иллюминаторы ОИ-1 ОИ-3	Освещение поверхности непрозрачных или полупрозрачных объектов, рассматриваемых под микроскопом	Рассчитаны для работы с объективами в короткой оправе при тубусе 190 *мм* без покровного стекла	—	—	75×100×35	ОИ-3 имеет поляризационный фильтр между линзой и диафрагмой
Конденсор темного поля ОИ-2	Освещение препаратов в микроскопах косыми пучками проходящего света на темном поле	Наибольшая апертура 1,15 при масляной иммерсии	—	—	75×100×35	Применение ОИ-2 повышает разрешающую способность микроскопа
Оптический квадрант ОК	Измерение углов наклона к горизонту	120°	1 мин.	16×	150×120×50	Для установки на валы имеет в основании призменный паз
Оптический угломер УО	Ручной прибор для измерения углов	360°	10 мин.	16×	Зависит от длины и положения сменной линейки:	Длина сменных подвижных линеек 150 и 300 *мм*

Таблица 28

Лупы

Наименование луп	Увеличение крат	Световой диаметр линзы в *мм*	Поле зрения в *мм*	Рабочее расстояние в *мм*	Примечание
Складные апланатические	10	13	15	21	
	20	6	6	10	
Складные	2,5	36	45	98	
	4	19,5	15	34,8	
	7	29	30	56,5	
Часовые:					
ЛПК-451	1,7	26	120	145	
ЛПК-452	2,3	26	90	105	
ЛПК-457	2,3	18	50	105	
ЛПК-453	2,8	26	65	85	
ЛПК-454	3,5	26	50	65	
ЛПК-455	4	26	45	60	
ЛПК-456	5	26	35	50	
ЛПК-458	5	18	22	50	
ЛПК-459	10	18	10	22	
Штативные:					
ЛПШ-23	4	29	45	62	
ЛПШ-24	6,5	29	25	31	
ЛПШ-25	8	17	18	22	
Измерительная К-140004	10	13	15	Шкала кладется на объект	Имеют шкалу в поле зрения с делениями ценой 0,1 *мм*
Лупа Польди ЛП	16			То же	
Люминесцентная ЛПИ-451	6	30	30	»	На конус отверстия нанесен светящийся состав для освещения объекта в темноте
Набор луп НДЛ:					Минимальный размер объекта:
обзорная	2	26	120	125	0,05 *мм*
дешифровочная	4	26	50	60	0,03 *мм*
измерительная	10	13	15	21	0,0125 *мм*

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Вавилов С. И., под ред., Оптика в военном деле, АН СССР, 1945 и 1948.
2. Захарьевский А. Н., Интерферометры, Оборонгиз, 1952.
3. Кругер М. Я. и Кулижнов Б. М., Конструирование оптико-механических приборов, Машгиз, 1948.
4. Ландсберг Г. С., Оптика, ГИТТЛ, 1952.
5. Тудоровский А. Н., Теория оптических приборов, части I и II, АН СССР, 1948 и 1952.
6. Справочная книга оптика-механика, ОНТИ, 1936—1937.

ГЛАВА IX

АКУСТИКА

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Акустика — учение о звуке, его излучении, распространении и восприятии. Частные задачи технической акустики — шумоглушение, звукоизоляция, звукопоглощение, а также использование звука для различных технических целей (сигнализация, измерения, дефектоскопия и т. п.).

Звук в общем смысле — периодическое колебательное движение, волнообразно распространяющееся в упругой материальной среде (твердой, жидкой или газообразной). В газах и жидкостях звук распространяется в виде продольных волн, т. е. чередующихся сгущений и разрежений; в твердых телах могут возникать также поперечные волны, волны изгиба, кручения, сдвига.

В более узком смысле звуком называют лишь колебательные движения, обладающие частотами от 20 до 20 000 *гц* (см. ниже). Колебания с частотами ниже 20 *гц* называются *инфразвуками*, выше 20 000 *гц* — *ультразвуками*.

В табл. 1 приведены определения, обозначения и размерности основных физических величин, характеризующих звуковые процессы.

Таблица 1

Основные физические характеристики звука

Термин	Обозначение	Определение	Связь с другими величинами	Единица измерения	
				Обозначение и наименование	Выражение в физической системе единиц
Период	T	Наименьший промежуток времени, по истечении которого мгновенные значения периодически изменяющейся величины (например, звукового давления) начинают повторяться в той же последовательности		сек.	
Частота	f	Количество периодов, приходящееся на единицу времени	$f=\frac{1}{T}$	*гц* (герц)	1/сек
Скорость звука	c	Скорость распространения в пространстве звуковых колебаний		*см/сек*	
Длина звуковой волны	λ	Наименьшее расстояние (по направлению распространения колебаний) между двумя точками, находящимися в одинаковом звуковом режиме в один и тот же момент времени (например, в одинаковой фазе сгущения или разрежения)	$\lambda=\frac{c}{f}$	*см*	
Звуковое давление	p	Разность между мгновенным значением непрерывно изменяющегося давления в звуковой волне и постоянным атмосферным давлением, существующим в данной точке пространства при отсутствии звука		бар	*дина/см²*

Продолжение табл. 1

Термин	Обозначение	Определение	Связь с другими величинами	Единица измерения: Обозначение и наименование	Единица измерения: Выражение в физической системе единиц
Акустическое сопротивление	r_a	Произведение плотности среды на скорость звука в ней	$r_a = \rho c$	*ак.ом* (акустический ом)	$\frac{г}{см^2 сек}$
Колебательное смещение	x	Отклонение материальной частицы от положения равновесия под воздействием периодической возмущающей силы, в частности, звуковой волны		*см*	
Колебательная скорость	$\dot{x}$	Скорость колебательного смещения	$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{p}{\rho c}$	*см/сек*	
Акустическая мощность источника	P	Количество звуковой энергии, испускаемое источником звука в единицу времени		*вт* (ватт)	10^7 *эрг/сек*
Сила (интенсивность) звука	J	Количество звуковой энергии, проходящее в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения	$J = \frac{p^2}{\rho c} = \rho c \dot{x}^2$	*вт/см²*	$\frac{10^7 \text{ эрг}}{см^2 \cdot сек}$
Уровень силы звука (уровень звука)	L	Десятикратный логарифм (десятичный) отношения фактической силы звука в данной точке пространства к так называемой пороговой силе звука $J_0 = 10^{-16}$ *вт/см²*	$L = 10 \lg \frac{J}{J_0}$	*дб* (децибел)	

В табл. 2 приведены длины звуковых волн в зависимости от частоты для различных сред.

Таблица 2

Длина продольной звуковой волны в зависимости от частоты

Частота в *гц*	Длина волны в *см*		
	в воздухе	в воде	в стали
20	1700	7250	25 000
30	1130	4830	16 667
50	680	2900	10 000
100	340	1450	5 000
200	170	725	2 500
300	113	483	1 667
500	68	290	1 000
1 000	34	145	500
2 000	17	72,5	250
3 000	11,3	48,3	167
5 000	6,8	29	100
10 000	3,4	14,5	50
20 000	1,7	7,3	25
30 000	1,1	4,8	16,7
50 000	0,7	2,9	10
100 000	0,34	1,5	5
200 000	—	0,7	2,5
300 000	—	0,5	1,7
500 000	—	0,3	1
1000 000	—	0,15	0,5

Размеры препятствий, встречающихся на пути распространения звука, следует считать большими в тех случаях, когда они сравнимы с длиной волны или больше ее. В этих случаях препятствие представляет собой экран, за которым образуется „звуковая тень". Препятствия меньших размеров легко огибаются звуковой волной.

Это явление используется при ультразвуковой дефектоскопии (см. [7], [8], а также т. 6, гл. III), т. е. при обнаружении раковин и инородных вкраплений в толще металла. Обнаружение производится помощью зондирующего пучка звуковых лучей. Чем меньше длина волны зондирующего звука, тем более мелкие пороки он может обнаружить. Так, при исследовании стального массива при помощи звука частотой 10 000 *гц* можно обнаружить пороки, габариты которых не меньше 25 *см* (половина длины волны), при частоте звука 100 000 *гц* можно обнаружить раковину размером 2 – 2,5 *см*, а при 1 000 000 *гц* обнаруживаются уже раковины и подобные пороки, измеряемые в *мм*. Дальнейшее повышение частоты увеличивает разрешающую способность дефектоскопа.

В трубопроводах (воздушных, водяных) легко возбуждаются резонансные колебания, если частота нагнетателя (вентилятора, насоса) такова, что по

длине трубопровода укладывается одна или несколько полуволн.

Явление резонанса имеет место в турбинных лопатках и в лопастях вентиляторов и пропеллеров в тех случаях, когда по длине лопатки или лопасти (от ступицы до края) укладывается четверть звуковой волны.

АКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ СЛУХОВОЕ ВОСПРИЯТИЕ

[2], [6]

Восприятие частоты. Ухо воспринимает звуки с частотами от 16—20 до 16 000—20 000 *гц*. Границы слухового диапазона неодинаковы у разных людей и зависят от возраста и состояния слухового аппарата.

Связь между частотой и восприятием высоты звука очень проста. Чем больше частота, тем выше тон слышимого звука. Увеличение частоты вдвое (при любой исходной частоте) повышает тон звука всегда на одну и ту же величину, называемую *октавой*. Вообще увеличение частоты в одно и то же число раз воспринимается слухом как повышение тона на один и тот же интервал. Иначе говоря, равные отношения частот дают ощущение равных разностей высот тонов. Минимальное различие частот, воспринимаемое слухом при частотах выше 400 *гц*, составляет 0,3%. При более низких частотах это значение в 2—3 раза больше (до 1%).

Восприятие интенсивности. Минимальная величина звукового давления, необходимая для того, чтобы звук был слышен *(порог слышимости)* в области частот 800—2000 *гц*, составляет (для неповрежденного слуха) около $2 \cdot 10^{-4}$ бара (около $2 \cdot 10^{-10}$ *кГ/см*^{2}). Сила звука на пороге слышимости равна 10^{-16} *вт/см*^{2} (для той же области частот). В области 2000—5000 *гц* чувствительность слуха несколько обостряется; по мере приближения к верхней или нижней границе слухового диапазона она слабеет и постепенно исчезает.

Перегрузка слухового аппарата наступает лишь при давлениях, в несколько миллионов раз превосходящих пороговое (порядка 10^{+3} бара). При дальнейшем повышении звукового давления в ухе возникает болевое ощущение. При длительном пребывании в поле звука, близкого по интенсивности к болевому порогу, обычно имеют место повреждения слухового аппарата, связанные с частичной или полной потерей слуха.

При сопоставлении между собой двух или более звуков различной интенсивности полезно иметь в виду, что различие на 10 *дб* (при уровнях звука выше 60 *дб*) воспринимается слухом как примерно *двукратное* различие по громкости. Так, например, при повышении уровня звука от 60 до 70 *дб* слух ощущает удвоение громкости так же, как при повышении от 80 до 90 *дб* или от 90 до 100 *дб*.

Аналогично при понижении уровня звука на 10 *дб* имеет место уменьшение громкости вдвое. Значения эффективного снижения громкости при понижении уровня звука на различные интервалы (для уровней выше 60 *дб*):

Снижение уровня в *дб*	Субъективное ощущение снижения громкости в %
5	30
10	50
15	66
20	75

Минимальное воспринимаемое слухом изменение силы звука составляет примерно 10%, что в свою очередь соответствует примерно 1 *дб*.

Поэтому разбивка шкалы интенсивности звука на логарифмические единицы — децибелы — довольно хорошо соответствует субъективным свойствам слухового аппарата; более мелкое дробление не имеет практического смысла, так как изменения или различия в уровне силы звука (звуковом давлении) менее 1 *дб* не ощущаются слухом. В табл. 3 приведены значения силы звука и звукового давления, а также колебательной скорости воздушных частиц в плоской звуковой волне в зависимости от величин уровня звука, взятых с интервалом 10 *дб*. За нуль децибел принят уровень звука, соответствующий порогу слышимости.

В табл. 4 приведена связь между теми же величинами, но с интервалами через 1 *дб*. Таблица охватывает диапазон звуков средней громкости от 60 до 80 *дб*. Для любого другого диапазона приведенные в ней значащие цифры будут справедливы, разрядность же величин следует изменять в соответствии с табл. 3.

Уровень громкости. Громкость зависит не только от интенсивности звука, но в некоторой мере также от частоты.

Таблица 3

Сила звука, звуковое давление и колебательная скорость в зависимости от уровня звука (для воздушной среды)

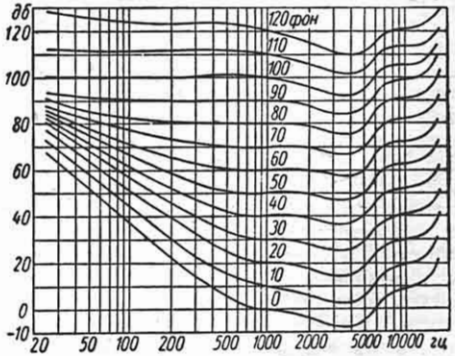
Уровень звука в *дб*	Сила звука в *вт/см²*	Звуковое давление в барах (*дн/см²*)	Колебательная скорость в *см/сек*	Примерные условия, соответствующие данным таблицы
0	10^{-16}	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	Порог слышимости
10	10^{-15}	$6{,}25 \cdot 10^{-4}$	$1{,}6 \cdot 10^{-5}$	Лес при безветрии
20	10^{-14}	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	Шопот средней громкости на расстоянии 1 *м*
30	10^{-13}	$6{,}25 \cdot 10^{-3}$	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	Тихая жилая комната
40	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	Разговор вполголоса
50	10^{-11}	$6{,}25 \cdot 10^{-2}$	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$	Тихое учреждение
60	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-3}$	Улица средней оживленности. Шумное учреждение
70	10^{-9}	$6{,}25 \cdot 10^{-1}$	$1{,}6 \cdot 10^{-2}$	Комната машинисток
80	10^{-8}	2	$5 \cdot 10^{-2}$	Грузовой автомобиль
90	10^{-7}	6,25	$1{,}6 \cdot 10^{-1}$	Московский метрополитен
100	10^{-6}	20	$5 \cdot 10^{-1}$	В кабине пассажирского самолета
110	10^{-5}	62,5	1,6	Поезд-экспресс, большая скорость
120	10^{-4}	200	5	В открытом самолете с мощным двигателем
130	10^{-3}	625	16	Болевое ощущение

Чтобы иметь возможность количественного сопоставления громкостей звуков различных частот, введено понятие об *уровне громкости*, единицей измерения которого является *фон*. По определению уровень громкости в фонах численно совпадает с уровнем силы звука в децибелах при частоте 1000 *гц*. Для других частот они расходятся в соответствии с закономерностями, отраженными в графике кривых равной громкости (фиг. 1), построенных на основе массового эксперимента и соединяющих точки, отвечающие одинаковому ощущению громкости. Эти закономерности проявляются при уровнях ниже 90 *дб*, и чем ниже уровень, тем больше частота

Таблица 4

Сила звука, звуковое давление и колебательная скорость (эффективные значения) в зависимости от уровня звука (для диапазона 60—80 *дб*)

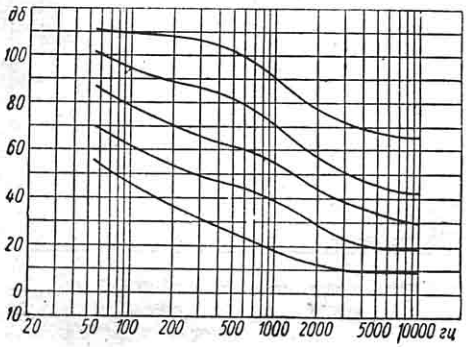
Уровень звука в *дб*	Сила звука в *вт/см²*	Звуковое давление в барах (*дн/см²*)	Колебательная скорость в *см/сек*
60	$1{,}0 \cdot 10^{-10}$	0,20	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$
61	1,26	0,22	5,6
62	1,6	0,25	6,3
63	2,0	0,28	7,1
64	2,5	0,31	7,9
65	3,2	0,35	8,9
66	4,0	0,40	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$
67	5,0	0,46	1,12
68	6,3	0,50	1,26
69	8,0	0,56	1,40
70	$1{,}0 \cdot 10^{-9}$	0,63	1,58
71	1,26	0,71	1,77
72	1,6	0,79	2,0
73	2,0	0,89	2,2
74	2,5	1,00	2,5
75	3,2	1,12	2,8
76	4,0	1,26	3,1
77	5,0	1,40	3,5
78	6,3	1,58	4,0
79	8,0	1,77	4,6
80	$1{,}0 \cdot 10^{-8}$	2,00	$5{,}0 \cdot 10^{-2}$



Фиг. 1. Кривые равной громкости звука.

влияет на ощущение громкости. Для громких звуков (выше 90 *дб*) можно считать уровень громкости практически не зависящим от частоты и совпадающим с уровнем силы звука при всех частотах, кроме области 3000—4000 *гц*, где уровень громкости на 5—10 *дб* выше уровня звука.

Воздействие шума на организм человека. Звуки, уровень которых превышает 70 *дб*, влияют на слушателя раздражающе и утомляюще. Длительное пребывание в поле действия громкого шума приводит к нарушению нормальной деятельности центральной нервной



Фиг. 2. Кривые „равной неприятности" звука.

системы, в связи с чем понижается производительность труда. Шум высокого уровня вреден также и для слухового аппарата, который под его воздействием разрушается частично или полностью.

Наиболее раздражающими являются звуки высоких частот, как видно из приведенных на фиг. 2 кривых „равной неприятности" звука, построенных по тому же принципу, что и кривые равной громкости. Кривые равной неприятности заметно расходятся по своему характеру с кривыми равной громкости. Только при очень низких уровнях (20—30 *фон*) они довольно удовлетворительно совпадают. Поэтому при оценке физиологической неприятности звука необходимо знать не только уровень силы звука (или громкости), но и частоту. Основные раздражающие звуки лежат в области частот выше 700—1000 *гц* и в особенности выше 2000 *гц*.

Сложные звуки. Звуковой спектр. Всякий периодический звуковой процесс, при котором изменение звукового давления происходит не по синусоидальному закону, воспринимается слухом как *сложный звук*, т. е. как звук, составленный из нескольких чистых (синусоидальных) тонов. Совокупность чистых тонов, образующих сложный звук, называется его *звуковым спектром*. Звуковой спектр может быть дискретным (составленным из конечного ряда слагающих, размещенных на конечных интервалах частот) или непрерывным. В последнем случае звуковая энергия непрерывно распределена в более или менее широкой полосе частот.

Шум. В технической акустике термин „шум" обозначает сложный звуковой процесс с богатым спектром, обладающим как непрерывной частью, так и дискретной (последняя в некоторых случаях может и отсутствовать). Некоторые шумы содержат звуки ударного характера (импульсы).

Измерение шума [4], [11]. Советская промышленность выпускает несколько типов приборов, предназначенных для измерения уровня звука и называемых *шумомерами*. Шумомеры отградуированы в децибелах и, как правило, имеют пределы измерения 30—140 *дб*. Если шум имеет сложный состав, то шумомер измеряет общий (интегральный) уровень звука, определяемый суммарной энергией всех компонент шума. Для низких уровней звука предусматривается частотная коррекция (по кривым равной громкости), позволяющая производить приближенное определение уровня громкости.

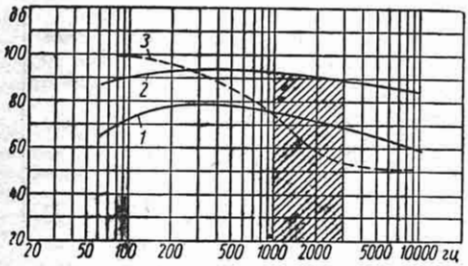
Шумомер состоит из микрофона, усилителя и стрелочного измерительного прибора. В портативных шумомерах Ш-1 и Ш-2 используется пьезоэлектрический микрофон из сегнетовой соли. Шумомер Ш-1 питается от сети переменного тока 127—220 *в*. Шумомер Ш-2 имеет внутренние источники питания (сухие батареи) и является совершенно автономным измерительным прибором. Шумомер может регистрировать звуковые импульсы длительностью не менее 0,1 сек. Он обслуживается одним человеком, не обладающим специальной квалификацией.

Восприятие речи на фоне шума. Уровень громкости речи составляет 40—50 *фон* при разговоре вполголоса, 60—70 *фон* при обычном разговоре и 70—80 *фон* при разговоре повышенным (ораторским, лекторским) голосом.

На фиг. 3 показано распределение энергии в спектре речи для среднего мужского голоса при повышенной громкости (кривая *1*). Заштрихованная

область в интервале частот 1000—3000 *гц* содержит частоты, определяющие разборчивость речи.

Сильный шум маскирует речь, затрудняет ее восприятие. Если уровень шума примерно одинаков с уровнем речи, то разборчивость речи еще вполне удовлетворительна. Для полной маскировки необходимо, чтобы шум превысил уровень речи на 15—17 *дб* (кривая *2* на фиг. 3). В области низких частот (до 1000 *гц*) уровень шума может лежать даже еще



Фиг. 3. Распределение энергии в спектре речи; порог маскировки.

выше: это отразится на характере восприятия звука речи, но не понизит существенно его разборчивости (если уровень шума лежит значительно ниже порога маскировки в области частот выше 1000 *гц*). На фиг. 3 (кривая *3*) нанесена спектрограмма шума весьма высокого уровня (100 *дб*), при наличии которого разборчивость речи (без напряжения голоса) составляет 95%.

Отражение и поглощение звука. Звукопроводность. При падении звуковой волны на препятствие (стену, пол, потолок) часть энергии отражается, а остальная энергия проходит в преграду и частично поглощается, т. е. обращается в тепло за счет работы сил трения в материале преграды, частично же излучается по другую сторону

Отношение поглощенной энергии $J_{погл}$ к падающей J называется *коэффициентом звукопоглощения* данного материала (конструкции):

$$\alpha = \frac{J_{погл}}{J}.$$

Отношение отраженной энергии $J_{отр}$ к падающей называется *коэффициентом отражения*:

$$\beta = \frac{J_{отр}}{J}.$$

Отношение энергии, прошедшей сквозь преграду $J_{пр}$, к падающей энергии называется *коэффициентом звукопроводности*:

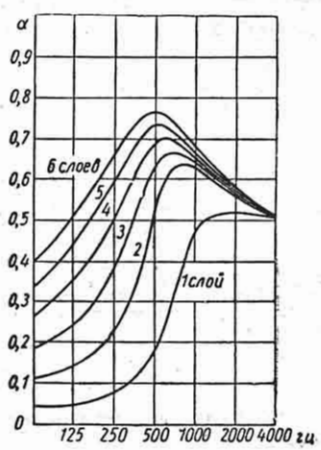
$$\tau = \frac{J_{пр}}{J}.$$

Все три коэффициента связаны между собой соотношением $\alpha + \beta + \tau = 1$.

Коэффициент звукопроводности обычно бывает во много раз меньше остальных коэффициентов (см. стр. 263 и 264). Кроме того, с точки зрения внутренней акустики какого-либо помещения практически безразлично, теряется ли звуковая энергия на трение или уходит в соседнее помещение за счет звукопроводности; поэтому в подобных случаях можно, пренебрегая коэфициентом звукопроводности, считать, что

$$\alpha = 1 - \beta = 1 - \frac{J_{отр}}{J}.$$

Коэффициент звукопоглощения зависит от фактуры вещества, толщины слоя, наличия или отсутствия воздушного зазора под ним либо экрана (слоя краски, воздухонепроницаемой ткани, металла, фанеры) перед ним. Хорошими звукопоглотителями являются все материалы с густыми и мелкими *открытыми* порами: вата, войлок (не очень плотный) и т. п. Особенно хорошо эти материалы поглощают высокие частоты. Для полу-



Фиг. 4. Звукопоглощение войлока.

чения хорошего звукопоглощения на низких частотах необходимо увеличивать толщину поглощающего слоя. На фиг. 4 приведено семейство характеристик

Таблица 8

Коэффициенты звукопоглощения

Материал	Частота в *гц*					
	125	250	500	1000	2000	4000
Материалы общего назначения						
Стена кирпичная:						
неоштукатуренная	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
оштукатуренная и окрашенная	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Переборка деревянная оштукатуренная	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03
Технический войлок толщиной 2,5 *см*	0,09	0,34	0,55	0,66	0,52	0,39
Ткань хлопчатобумажная, подвешенная на стене без складок, с поверхностным весом 360 *Г/м²*	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
То же 500 *Г/м²*	0,04	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Пробковая плита толщиной 2 *см*, приклеенная к стене	0,08	—	0,08	0,19	0,21	0,22
Линолеум	0,02	—	0,03	—	0,04	—
Сосновая панель	0,10	0,11	0,10	0,09	0,08	0,11
Стекло оконное	0,03	—	0,03	—	0,02	—
Специальные акустические материалы, разработанные в СССР						
Арборит 2 *см* толщины, вплотную на стене:						
обыкновенный	0,28	0,32	0,44	0,46	0,48	0,53
огнестойкий	0,18	—	0,41	0,48	0,52	0,54
перфорированный	0,31	0,33	0,47	0,53	0,59	0,64
Асбестит АЦА толщиной 3,5 *см*	0,32	0,40	0,36	0,35	0,37	0,35
Асбестовая вата, слой 10 *см* под металлическим перфорированным экраном (отверстия ⌀ 4 *мм*, интервал 30 *мм*)	—	0,90	0,70	0,45	0,22	0,12
Акустическая штукатурка АЦП толщиной 3,5 *см*	0,22	0,27	0,31	0,31	0,33	0,40
Вермикулит АВК толщиной 3,5 *см*	—	—	0,19	0,21	0,26	0,30
Акустолит АСП толщиной 3,5 *см*	—	—	0,25	0,24	0,22	0,22
Асбосиликат АСА толщиной 4,5 *см*	0,60	0,73	0,80	0,82	0,81	0,70
Хлопчатобумажная вата под металлическим экраном (отверстия ⌀ 5 *мм*, интервал 20 *мм*), объемный вес 30 *кГ/м³*, вплотную на стене при толщине слоя в *см*:						
9	0,33	0,88	0,86	0,78	0,67	—
0,8	0,05	0,04	0,19	0,43	0,5	—
Авиационный теплоизоляционный материал:						
АТИМХ-10	0,03	0,03	0,07	0,22	0,35	—
АТИМХ-15	0,03	0,04	0,15	0,43	0,56	—
Плитка из мелкой кирпичной крошки, вяжущее—цемент; толщина 3,5 *см*; вплотную на стене	0,04	0,14	0,25	0,34	0,40	—
То же, с зазором 5 *см*	0,19	0,22	0,20	0,25	0,34	—

звукопоглощения войлока при различной толщине (от одного до шести слоев).

В табл. 5 приведены значения коэффициентов звукопоглощения различных материалов (общего назначения и специальных) в зависимости от частоты звука.

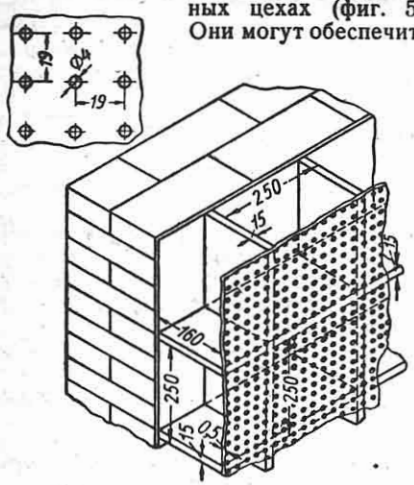
В некоторых случаях нужно знать не коэффициент звукопоглощения, а так называемое *полное звукопоглощение*, представляющее собой произведение коэффициента звукопоглощения на площадь S поглощающего материала:

$$A = \alpha \cdot S.$$

Единица измерения полного звукопоглощения носит название *сэбин* и имеет размерность площади ($м^2$).

В странах, где единицей измерения площади является кв. фут, сэбином называется соответственно более мелкая единица. При пересчете поглощения, выраженного в американских или английских сэбинах, на метрические сэбины следует уменьшать соответствующие цифры в 10,75 раза.

Резонансное звукопоглощение. Среди поглотителей, разработанных в Советском Союзе, особое место занимают так называемые *резонансные звукопоглотители* (РЗП) [5], отличающиеся рядом ценных качеств и применяемые для шумоглушения в производственных цехах (фиг. 5). Они могут обеспечить



Фиг. 5. Резонансный звукопоглотитель.

любой коэффициент звукопоглощения на заранее заданной частоте и позволяют осуществлять практически любую форму частотной характеристики чисто расчетным путем (при умеренно высоком коэффициенте поглощения, порядка 0,4—0,6).

Резонансный звукопоглотитель представляет собой перфорированный лист металла, фанеры или иного жесткого материала, помещенный на определенном расстоянии от стены (потолка). Пространство под листом может быть разбито на отсеки размерами 200—300 *мм*. Отверстия перфорации затягиваются пористым материалом (ткань, густая сетка), имеющим определенное сопротивление продуванию (при продувании сквозь него воздуха). Сопротивление продуванию называют также „коэффициентом трения".

Характеристика РЗП определяется размером перфораций и расстоянием между ними, сопротивлением ткани продуванию, глубиной воздушного зазора и наличием или отсутствием отсеков под перфорированным листом; имеет значение также толщина перфорированного листа.

В табл. 5 приведены конструктивные данные четырех типов резонансных поглотителей.

При подборе материалов для изготовления того или иного РЗП следует комбинировать слои так, чтобы сумма их сопротивлений продуванию давала цифру, указанную в табл. 6. При этом

Таблица 6

Конструктивные данные резонансных звукопоглотителей

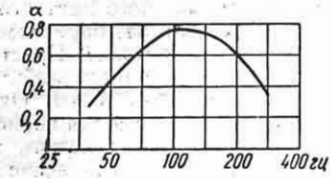
Наименование (условное)	Глубина зазора	Диаметр перфорации	Расстояние между перфорациями	Толщина листа	Сопротивление продуванию в *акг·сек/см³*
	в *мм*				
РЗП-1	160	25	160	5	3
РЗП-2	330	4	26	0,5	3
РЗП-3	160	4	19	0,5	6
РЗП-4	80	5	17	0,5	12

можно руководствоваться следующими ориентировочными данными о сопротивлении продуванию некоторых пористых материалов:

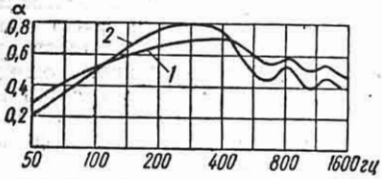
Марля в один слой	0,4—0,8
Миткаль редкий технический	1,0
Бязь редкая	3,0
Сетка металлическая, очень густая (шаг сетки 0,12 *мм*, проволока 0,05 *мм*)	3,0
Ситец редкий	5—6
Перкаль	6,5
Молескин	8,0
Байка, батист	40—80
Ткань стеклянная	3—100

Частотные характеристики звукопоглотителей даны на фиг. 6—9.

Простой прибор для определения сопротивления продуванию изображен на



Фиг. 6. Характеристика узкополосного звукопоглотителя РЗП-1.



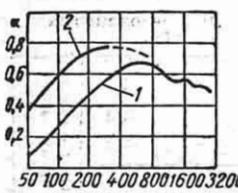
Фиг. 7. Характеристика широкополосного звукопоглотителя РЗП-2: *1* — при сопротивлении продуванию 3 *ак. ом/см²*; *2* — при сопротивлении продуванию 1,5 *ак. ом/см²*.

фиг. 10. Бутыль *1* объемом 10—20 *л* заткнута резиновой пробкой, сквозь которую пропущены две трубки. Через длинную трубку в бутыль поступает вода (из водопровода). По другой — короткой — трубке из бутыли вытесняется воздух. Воздух проходит через патрубок *2*, выходное отверстие которого закрыто одним или несколькими слоями исследуемого материала *3* (в местах прилегания материала к патрубку должен быть обеспечен плотный прижим или обмазка тавотом, чтобы предотвратить утечку воздуха через щели). Перед патрубком включен микроманометр *4* (см. стр. 11), измеряющий перепад давления по обе стороны материала. Секундомером или часами измеряется время, в течение которого вода вытесняет известный объем воздуха, заключенный между двумя рисками на бутыли (в нижней части бутыли оставляется объем 1—2 *л*, в процессе заполнения которого устанавливается равномерное течение воды). Если известен объем V в *л* и площадь S поперечного сечения патрубка в *см²*, то сопротивление продуванию вычисляется по приближенной формуле

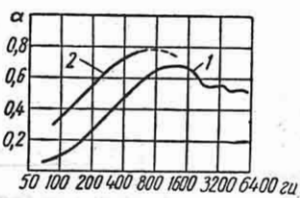
$$r = 0{,}1\,\frac{pSt}{V},$$

где давление p измерено в *мм* вод. ст. (или — что то же — в *кГ/м²*), а время t — в сек.

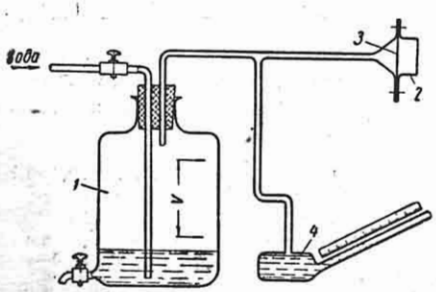
Измерения можно производить также при выпуске воды через сточное отверстие в нижней части бутыли или через сифон.



Фиг. 8. Характеристика высокочастотного звукопоглотителя РЗП-3: *1* — без отсеков; *2* — с отсеками.



Фиг. 9. Характеристика широкополосного звукопоглотителя РЗП-4: *1* — без отсеков; *2* — с отсеками.



Фиг. 10. Прибор для определения сопротивления продуванию.

Эхо и реверберация. При падении звуковой волны на препятствие (например, стену) имеет место частичное или полное отражение звука. Если падающий звук имеет отрывистый характер (импульс), а отраженный достаточно силен и приходит к слушателю с запозданием не менее чем на $^1/_{20}$ сек. после основного звука, то наблюдается хорошо известное явление *эха*.

Эхо наблюдается обычно на открытом воздухе близ крутых обрывов или стен одиноких строений. Иногда эхо наблюдается и в закрытых помещениях; при этом линейный размер помещения должен быть не менее 10—15 *м*.

Звуки, отраженные от стен малого помещения, приходят к слушателю вслед за основным звуком слишком быстро и не различаются слухом как эхо, а воспринимаются как некоторая затяжка зву-

чания основного звука. При этом в замкнутом помещении к слушателю приходят отражения от различных стен, пола, потолка, т. е. различные по направлению. Эти отражения могут быть многократными, и в малозаглушенном помещении интенсивность их падает со временем лишь весьма постепенно. Поэтому каждый отрывистый звук в таких помещениях превращается в довольно ровный, постепенно замирающий гул. Это явление носит название *реверберации*.

Чем больше звукопоглощение помещения, тем меньше длительность реверберации. Если ограждающие поверхности облицованы абсолютно поглощающим материалом, то реверберация пропадает совершенно.

Одновременное существование в помещении как прямого звука, так и большого количества отраженных существенно повышает уровень звука. Сила звука в реверберирующем помещении равна

$$J = P\left[\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha_{ср})}{\alpha_{ср} S}\right],$$

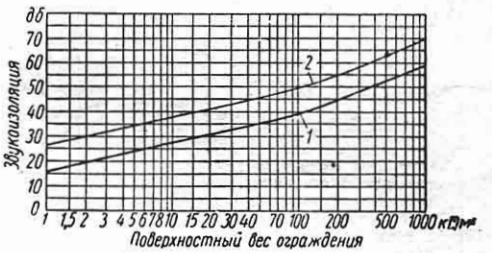
где $\alpha_{ср}$ — средний коэффициент звукопоглощения в помещении; S — общая площадь ограждающих поверхностей; P — мощность источника звука; r — расстояние от источника звука.

Первый член правой части соответствует силе „прямого" звука, а второй — силе рассеянного (отраженного) звука. Нетрудно видеть, что в обширном количестве практически интересных случаев сила звука на некотором расстоянии от источника определется почти исключительно рассеянным звуком.

Звукоизоляция ([1], [9]). Звукоизоляцией называется разность уровней звука (в децибелах) между двумя точками пространства, разделенными преградой, по одну сторону которой находится источник звука. Если преграда однородна и простирается безгранично, разделяя все пространство на два полупространства, в которых отсутствуют отражающие звук поверхности, то звукоизоляция ее есть десятикратный логарифм (десятичный) обратной величины коэффициента звукопроводности:

$$ЗИ = 10 \lg \frac{1}{\tau}.$$

Определенная таким образом звукоизоляция (иногда называемая *теоретической* звукоизоляцией) является такой же характерной константой преграды, как и коэффициент звукопроводности. Звукоизоляция конструкции, не имеющей отверстий или пор, через которые может проникать воздух, определяется поверхностным весом конструкции. Эта зависимость представлена графически на фиг. 11. Нижняя линия *1* соответствует звукоизоляции монолитной конструкции, верхняя *2* — двухслойной, в которой слои разделены воздушным зазором 10—15 *см* и не имеют жесткой



Фиг. 11. Зависимость звукоизоляции от поверхностного веса ограждения.

связи. Данные о звукоизоляции некоторых строительных конструкций приведены в табл. 7.

Практическая звукоизоляция ($\overline{ЗИ}$) какого-либо помещения зависит не только от теоретической звукоизоляции преграды (стены, перекрытия), но и от звукопоглощения поверхностей, ограждающих помещение. Чем больше полное звукопоглощение в помещении, тем больше звукоизоляция этого помещения. Практическая звукоизоляция связана с теоретической звукоизоляцией формулой

$$\overline{ЗИ} = ЗИ + 10 \lg \frac{A}{S_1}\left(1 - \frac{\alpha_{ср}}{2}\right),$$

где S_1 — площадь поверхности изолирующей стены или перекрытия; $A = \Sigma \alpha S$ — полное звукопоглощение в помещении; $\alpha_{ср}$ — средний коэффициент звукопоглощения, равный $\frac{A}{\Sigma S}$.

Вибрационная звукопередача. При передаче звука через стену, перекрытие или иную ограждающую конструкцию, лишенную отверстий, происходит возбуждение в этой конструкции вибраций звуковой частоты.

Ограждение, возбужденное звуковой волной, падающей с одной стороны,

Таблица 7

Звукоизоляция различных конструкций

Конструкция	Толщина в *см*	Поверхностный вес в *кГ/м²*	Звукоизоляция в *дб*
Клееная фанера 5 *мм* . .	0,5	2,2	20
Стенка из листового алюминия толщиной в *мм:*			
1	0,1	2,6	20
2	0,2	5,2	23
3	0,3	7,8	26
5	0,5	13	28
Стенка из листовой стали толщиной в *мм:*			
2	0,2	15,6	29
3	0,3	23,4	31
5	0,5	39	34
Стойки деревянные 50 × 50 *мм*, обшитые с двух сторон фанерой 3 — 5 *мм*	6	5	23
То же 50 × 150 *мм*, обшитые с двух сторон тесом под штукатуркой	22	110	39
Подвесная стенка — штукатурка по сетке Рабитца	2,5	31	32
Пенобетон оштукатуренный	11	122	40
Кирпичная стена, оштукатуренная с двух сторон, толщиной:			
1/4 кирпича	9	153	42
1/2 кирпича	15	228	46
1 кирпич	27	457	52
1 1/2 кирпича	40	685	55
2 кирпича	53	900	58
Шлаковые камни оштукатуренные	21	350	50
Перекрытие железобетонное в зависимости от веса			45—55

излучает звук на другую сторону. При этом чем больше колебательная скорость движения ограждающей поверхности, тем выше уровень звука за ней. С точностью до нескольких децибел этот уровень равен

$$L = 20 \lg \frac{\dot{x}}{\dot{x}_0} = 20 \lg \dot{x} + 106,$$

где $\dot{x}$ — колебательная скорость движения ограждения в *см/сек*; $\dot{x}_0 = 5 \times 10^{-6}$ *см/сек* — колебательная скорость, соответствующая пороговому уровню звука (0 *дб*).

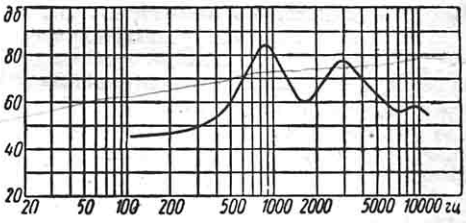
Вибрации ограждений могут возбуждаться и источником колебаний, расположенным непосредственно на поверхности ограждения, например, каким-либо механизмом. При этом поверхность ограждения излучает шум, интенсивность которого зависит от колебательной скорости излучающей поверхности. С достаточной для практических целей точностью эта связь дана в табл. 3 и 4.

БОРЬБА С ШУМАМИ
([1], [2], [4], [10], [12])

Шумы механизмов. Шумы большинства механизмов слагаются в различных сочетаниях из звуков, возникающих при: а) соударениях деталей механизма (например, зубьев шестерен); б) обтекании газовым потоком выступающих частей; в) выхлопе газов из рабочих цилиндров; г) магнитострикции ферромагнитных деталей (например, сердечников трансформаторов).

Шумы ударного происхождения характеризуются высокочастотным спектром, типичным для шума зацепления у ткацкого станка, отбойного молотка и т. п. Однако возможны случаи, когда ударное возбуждение вызовет шум низкой частоты; для этого достаточно, чтобы система, возбуждаемая ударами, имела отчетливо выраженные низкие собственные частоты. Так, например, при ударах молотка о лист железа возбуждаются не только высокие частоты, свойственные удару, но и низкие, соответствующие резонансам листа.

На фиг. 12 представлена спектрограмма шума, производимого при зацеплении



Фиг. 12. Спектр шума при зацеплении пары шестерен.

пары стальных шестерен (число зубьев 32, скорость вращения 1650 об/мин, мощность 10 *квт*).

Основная частота этого шума определяется числом соударений в секунду

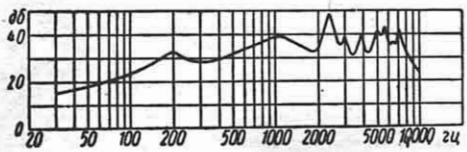
$$f = \frac{nz}{60},$$

где n — число оборотов в минуту и z — число зубьев. Для шестерен, спектр шума которых приведен на фиг. 12, эта

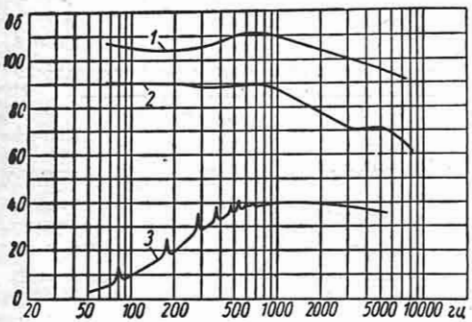
частота должна быть около 900 *гц*, что вполне согласуется с опытом. Кроме того, в спектре отчетливо выражена третья гармоника — около 2700 *гц*.

Шум, возникающий при обтекании тел газовым потоком, связан с вихревой дорожкой Кармана, которая при этом образуется. Этот шум имеет основной период, зависящий от скорости потока и размеров обтекаемого тела. На практике, однако, обе эти величины зачастую не имеют постоянных значений и плавно изменяются в пространстве (например, при обтекании воздушным потоком вращающегося винта сечение потока и его относительная скорость зависят от радиуса точки наблюдения). Поэтому аэродинамический шум обычно имеет непрерывный спектр, распределенный в широком диапазоне частот.

На фиг. 13 изображен спектр шума пылесоса, в котором отчетливо выделяется пик в области 250 *гц* и ряд



Фиг. 13. Спектр шума пылесоса.



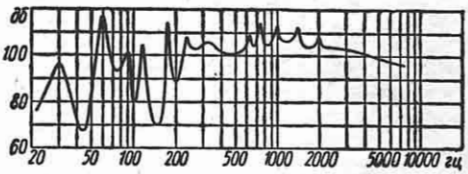
Фиг. 14. Спектры шума вентиляторов: *1*—мощный быстроходный вентилятор (3000 об/мин, число лопастей 12, производительность 100 000 *м³/час*); *2* — „малошумный" вентилятор такого же типа; *3*— специальный „бесшумный" вентилятор малой производительности.

менее интенсивных пиков, соответствующих свисту воздуха на приточном патрубке пылесоса.

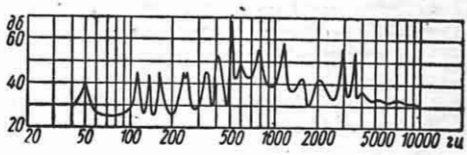
На фиг. 14 показаны спектры шума вентиляторов.

Только в одном из них — спектре маломощного и „бесшумного" вентилятора — заметны дискретные пики на фоне непрерывного шумового спектра. Эти пики не связаны, однако, с движением воздушного потока, а имеют электромагнитное происхождение.

Шум выхлопа имеет основную частоту, определяемую количеством оборотов и числом цилиндров двигателя.



Фиг. 15. Спектр шума выхлопа авиадвигателя.



Фиг. 16. Спектр шума малого электродвигателя постоянного тока.

Для четырехтактного двигателя эта частота равна

$$f = \frac{ni}{120},$$

где n — число оборотов вала в минуту; i — число цилиндров двигателя.

Спектр выхлопа имеет большое количество обертонов как дискретных, так и непрерывно распределенных в широком частотном диапазоне. На фиг. 15 показан спектр шума выхлопа авиадвигателя.

Магнитный шум имеет место в электромагнитах, трансформаторах, электродвигателях и т. п. Спектр его имеет дискретный характер; амплитуды гармоник обычно убывают по мере повышения частоты. Примером такого спектра может служить приведенный на фиг. 16 спектр шума малого электродвигателя постоянного тока, в котором основная частота магнитного шума лежит около 500 *гц*.

Интенсивность всех перечисленных шумов зависит от многих факторов, в первую очередь от мощности механизма, и может меняться в весьма широких пределах. Особенно громкими могут быть

ударные звуки (например, шум клепального молота, ткацкой машины) и аэродинамический шум (мощные вентиляторы, винты авиадвигателей). Шум выхлопа даже в мощных поршневых авиадвигателях обычно имеет несколько более низкий уровень, чем аэродинамический шум. Интенсивность магнитного шума обычно бывает еще меньше; он проявляется только тогда, когда отсутствуют шумы другого происхождения или когда приняты эффективные меры для их заглушения.

Борьба с шумом в источнике. Наиболее эффективным способом борьбы с шумом является уничтожение шума в его источнике. Для звуков ударного происхождения это достигается применением материалов и конструкций, не способных приходить в интенсивные колебания благодаря большому внутреннему затуханию. Так, например, незвонкие текстолитовые шестерни дают шум на 20—30 *дб* более низкого уровня, чем металлические. При наличии в механизме металлических деталей, способных к мембранным колебаниям, хорошие результаты дает замена этих деталей текстолитовыми и пластмассовыми или подклейка к ним демпфирующих материалов — войлока, картона, асбестовой или хлопчатобумажной ткани.

Большое значение имеет точность профиля зуба шестерен, идентичность зубьев, а также отсутствие чрезмерных зазоров (игры) и свободного хода, способствующих возникновению ударного шума.

Аэродинамический шум иногда может быть ослаблен приданием обтекаемой формы деталям, на которых он возникает, а также понижением скорости обтекания.

Магнитный шум тем ниже, чем меньше потери в материале магнитопровода.

Во всех перечисленных случаях понижение шума достигается при помощи тех же мероприятий, какие приводят к повышению к. п. д.

В тех случаях, когда борьба с шумом в источнике невозможна или не обеспечивает необходимой бесшумности, приходится прибегать к мерам амортизации, звукоизоляции и т. п.

Амортизация ([1], [2]). Эта мера заключается в отделении шумного механизма от опорных поверхностей, которые могут возбуждаться вибрациями механизма и быть излучателями звука. Осуществляется это введением эластичных прокладок под лапы механизма или под плиту, на которой он смонтирован.

Чем массивнее механизм и плита, а также чем меньше упругость прокладок, т. е. чем ниже собственная частота системы механизм—прокладки, тем выше эффект амортизации. Во всяком случае эта частота должна лежать ниже того диапазона, в котором требуется получить ослабление шума. Для большинства механизмов она не должна превышать 10—15 *гц*.

Для амортизации могут быть использованы стальные пружины, резина, войлок и специальные амортизаторы.

Собственная частота f_0 механизма на пружинах связана со статической осадкой пружин под действием нагрузки соотношением

$$f_0 = \frac{5}{\sqrt{H}},$$

где H — статическая осадка в *см*.

Амортизационные пружины удобно выполнять из гнутых полос пружинной стали. Собственные частоты механизмов, установленных на такие пружины, довольно точно определяются формулой

$$f_0 = K \cdot 10^3 \sqrt{\frac{b}{P}\left(\frac{h}{r}\right)^3},$$

где b, h и r — соответственно ширина, толщина и радиус кривизны пружины в *мм*; P — вес, приходящийся на каждую пружину, в *кГ*; K — коэффициент, приведенный в табл. 8

Таблица 8

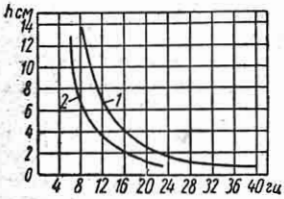
Упругие свойства амортизационных пружин

Назначение пружины	Схематический чертеж	Коэффициент K
Опорная для вертикальной установки механизма		2,4
Для подвеса механизма к балке или перекрытию		0,8
Для подвеса механизма (другой тип)		1,2

Так как металл пружин хорошо проводит звуки высоких частот, рекомендуется комбинировать пружины с тонкими прокладками из войлока, пробки или резины (толщиной 3—5 *мм*).

При использовании в целях амортизации только прокладок из войлока или резины необходимо выбирать общую площадь прокладок в соответствии с величиной нагрузки таким образом, чтобы удельные давления не превышали 0,5 *кГ/см²* для войлока ($E = 20$ *кГ/см²*) и 3 *кГ/см²* для резины ($E = 60$ *кГ/см²*).

Толщина прокладки, необходимая для получения заданной собственной частоты, определяется по графику зависи-



Фиг. 17. Зависимость толщины войлочной или резиновой прокладки от собственной частоты.

мости собственной частоты от толщины прокладок из войлока (*1*) или резины (*2*), приведенному на фиг. 17.

При применении резины не следует делать габариты прокладки в плане превосходящими ее толщину более чем в 2—3 раза.

При конструктивном оформлении амортизаторов необходимо предотвратить возможность появления „звуковых мостиков" (обходных путей распространения вибраций). Таким „мостиком", например, явился бы болт, проходящий через прокладку и касающийся головкой лапы механизма, а гайкой — фундамента. Чтобы сохранить эффект амортизации, необходимо в этом случае вводить прокладку не только под лапу, но и на нее — под головку болта.

Звукоизоляция [1]. Амортизация приводит к желательным результатам только в тех случаях, когда излучение шума производится посредством вибраций поверхностей, на которых крепятся механизмы. Если же механизм излучает шум непосредственно в окружающую среду, то одной амортизации для существенного понижения уровня шума недостаточно. В этом случае необходимо окружить механизм звукоизоляционным кожухом, выполненным из материалов, обеспечивающих достаточно высокую звукоизоляцию (см. табл. 7).

Кожух выполняется плотным, сплошным, так как наличие даже небольших щелей и отверстий резко понижает звукоизоляцию. Внутренняя поверхность его облицовывается звукопоглощающим материалом с коэффициентом поглощения не менее 0,3 (для предотвращения чрезмерного повышения уровня шума в самом кожухе, которое может существенно ухудшить эффект звукоизоляции).

Глушение вентиляционных шумов ([3], [12]). Шумные вентиляторы устанавливаются на амортизаторах в изолированных камерах, стены которых облицованы звукопоглотителем с коэффициентом поглощения не ниже 0,5. Вентиляционный канал облицовывается со стороны изолируемого помещения звукопоглощающим материалом. Затухание звука в *дб* на 1 *пог. м* длины такого канала при распространении вдоль него (так называемое погонное заглушение) вычисляется по приближенной формуле Белова [3]:

$$\Delta = 1{,}1 \frac{P}{S} f(\alpha),$$

где P — периметр сечения канала (в случае, если облицованы не все стенки, учитывается только облицованная часть) в *м*; S — площадь поперечного сечения в *м²*; $f(\alpha)$ — функция коэффициента поглощения α, а именно:

$$f(\alpha) = 4\left(\frac{2 - \alpha - 2\sqrt{1-\alpha}}{\alpha}\right).$$

Длина облицованной части канала выбирается в зависимости от исходного уровня шума в начале канала, требуемого уровня в конце его и погонного заглушения Δ.

В целях повышения эффективности заглушения можно не только облицовать поглотителем стенки воздуховода, но ввести в канал звукопоглощающие щиты, расположенные внутри сечения вдоль потока воздуха. Тем самым канал как бы рассекается на несколько параллельных участков с относительно большим периметром.

Значения погонного заглушения Δ (в *дб/м*), которые получаются в таком секционированном канале (с облицовкой только тех стенок, которые параллельны щитам), в зависимости от коэффициента звукопоглощения α материалов щитов для расстояния между ними 0,1 *м*:

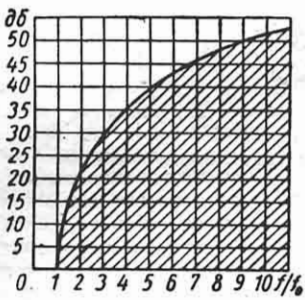
α	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05
Δ	88	56	47,5	38,6	34,0	29,7	26,0	22,6	19,7	17,1	14,5	12,5	10,5	8,8	7,5	5,7	4,8	3,5	2,2	1,1

Заглушение на 1 *пог. м* длины канала обратно пропорционально расстоянию между щитами. Так, при $\alpha = 0{,}85$ и расстоянии между щитами 0,4 *м* получаем

$$\Delta = \frac{38{,}6 \cdot 0{,}1}{0{,}4} = 9{,}65 \text{ } дб/м.$$

При определении Δ в каналах со щитами следует исходить из половинной толщины щита, полагая его как бы разрезанным на два симметричных слоя, обращенных в разные каналы и разделенных фиктивной жесткой стенкой.

Глушение шума выхлопа [10]. Для глушения шума, создаваемого выхлопными газами, не всегда можно применять глушители с поглощающим материалом. В этих случаях применяются так называемые реактивные глушители или акустические фильтры, состоящие из ряда последовательно расположенных расширительных камер, соединенных узкими трубками. Такой фильтр пропускает сквозь себя лишь звуки низких частот, для частот же, лежащих выше собственной частоты фильтра f_0, он представляет значительное препятствие. Эффективность фильтра растет с возрастанием частоты, как видно по кривой поглощения реактивного фильтра низкой частоты, показанной на фиг. 18, где заштрихованная область соответствует рабочему диапазону фильтра, состоящего из одной ячейки (камера + трубка). При частоте, вдвое превышающей собственную, фильтр может дать заглушение порядка 20 *дб*, а при частоте в 5 раз больше собственной — до 40 *дб*. Для получения суммарного заглушения при последовательном соединении нескольких ячеек заглушения их следует складывать; при этом, однако, получается несколько преувеличенный результат (иногда на 10—12 *дб*).



Фиг. 18. Кривая поглощения реактивного фильтра.

Пользоваться графиком фиг. 18 можно лишь для частот, при которых размеры ячейки фильтра не превышают 0,2—0,25 длины звуковой волны (табл. 2). Собственная частота ячейки вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{c}{\pi}\sqrt{\frac{S}{lV}},$$

где c — скорость звука в данном газе при данной (средней для ячейки) температуре в *м/сек*; S — площадь поперечного сечения трубки в $м^2$; l — длина трубки в *м*; V — объем камеры в $м^3$.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Алексеев С. П., Жаринов В. Д., Воробьев С. И., Звукоизоляция в строительстве, Стройиздат, М. 1949.

2. Алексеев С. П., Шум, Изд. АН СССР, М.—Л. 1948.

3. Белов А. И. и Файнштейн Н. Д., Экспериментальное исследование заглушения звука в вентиляционных каналах, „Журнал технической физики", т. 9, стр. 1499, 1939.

4. Беранек Л. Л., Акустические измерения, Издательство иностранной литературы, 1952.

5. Ржевкин С. Н. и Нестеров В. С., Резонансные звукопоглотители для строительной практики, Всесоюзное научно-техническое общество радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова, Труды секции электроакустики и звукозаписи, вып. 4, М. 1947.

6. Ржевкин С. Н., Слух и речь в свете современных физических исследований, II изд., 1936.

7. Соколов С. Я., Применение ультразвука в технике и физике, „Заводская лаборатория", т. 14, стр. 1328, 1948.

8. Соколов С. Я., Современные проблемы применения ультразвука, „Успехи физических наук", т. 40, стр. 3, 1950.

9. Техническая энциклопедия, II изд., статьи „Звук", „Звукоизоляционные конструкции", „Поглощение звука".

10. Шапиро Б. К., Основы расчета глушителей шума выхлопа, Труды ЦИАМ, № 47, Оборонгиз, М. 1943.

11. Шумомеры. Каталог-справочник измерительных приборов, БТИ МПСС, М. 1952.

12. Юдин Е. Я., Краткое руководство по акустическому расчету вентиляционных установок, Стройиздат Наркомстроя, М. 1945.

13. Юдин Е. Я., О шуме вентиляторов, Сборник ЦАГИ „Промышленная аэродинамика", М 1944.

ГЛАВА X

ХИМИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Химия подразделяется на *общую* химию [1], [24], [29], [44], [45], рассматривающую основные химические понятия и главнейшие химические законы; *неорганическую* [29], [44], [45], изучающую все элементы и их химические соединения, кроме соединений углерода; *органическую* [9], [33], [38], изучающую химические соединения, в которые входит углерод; *аналитическую*, разрабатывающую теорию и практику качественного и количественного анализа; *физическую* [3], [4], [6], [7], [8], [11], [12], [16], [30] (теоретическую), рассматривающую химические явления с точки зрения законов термодинамики, молекулярно-кинетической теории и современных достижений в вопросе строения атомов и молекул; *коллоидную* химию, изучающую коллоидные системы и поверхностные явления на границе раздела фаз, и т. д.

В развитии химии исключительную роль сыграли гениальные открытия М. В. Ломоносова и Д. И. Менделеева. Установление М. В. Ломоносовым в середине XVIII века основного закона химии — закона сохранения веса — ознаменовало возникновение химии как науки; открытием периодического закона в 1869 г. [15], [20], [24] Д. И. Менделеев положил начало современному нам этапу развития химии.

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН И ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ [29]

Химический элемент — совокупность атомов, характеризующихся одним и тем же порядковым номером.

Порядковый (атомный) номер элемента — число Менделеева — число электронов в свободном атоме элемента, равное числу положительных зарядов ядра атома, если единица заряда по абсолютной величине равна заряду электрона.

Периодический закон: свойства элементов периодически изменяются с возрастанием порядкового номера. В соответствии с этим законом в ряду элементов, расположенных по возрастанию порядкового номера, сходные по свойствам элементы повторяются и весь ряд разбивается на периоды из 2, 8, 8, 18, 18, 32 и 12 (незаконченный период) элементов. Из 98 известных элементов 88 встречаются в природе, а 10 элементов получены искусственно: № 43 — технеций, № 61 — прометий, № 85 — астатин, № 87 — франций, № 93 — нептуний, № 94 — плутоний (есть основание говорить о наличии в урановой руде 10^{-11}% плутония), № 95 — америций, № 96 — кюрий, № 97 — беркелий, № 98 — калифорний *.

Периодическая система элементов — классификационная таблица химических элементов, основанная на периодическом законе; в ее первоначальном виде была предложена Д. И. Менделеевым в 1869 г.

Располагая периоды один над другим так, чтобы левые их концы лежали на одной вертикальной прямой линии, получают „неукороченную" таблицу. Если же расположить длинные периоды в два ряда, один из которых состоит из 10, а другой — из 8 элементов, и поместить все элементы — лантаниды (правильнее „лантаноиды"), начиная с лантана (№ 57) до лутеция (№ 71), в одном месте, то получится обычная, „укороченная" периодическая таблица.

* В последнее время появились сведения об искусственном изготовлении элементов № 100 и 99. Первый из них назван центурием и ему дан химический символ Ct, а второй назван афинием, химический символ An. Также появились сведения о приготовлении изотопов элемента № 103, названного экалутецием.

Периодическая система элементов

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	0
1	1 H водород 1,0081						(H)	2 He гелий 4,003
2	3 Li литий 6,940 2 1	4 Be бериллий 9,02 2 2	5 B бор 10,82 3 2	6 C углерод 12,010 4 2	7 N азот 14,008 5 2	8 O кислород 16,0000 6 2	9 F фтор 19,00 7 2	10 Ne неон 20,183 8 2
3	11 Na натрий 22,997 8 1	12 Mg магний 24,32 8 2	13 Al алюминий 26,97 8 3	14 Si кремний 28,06 8 4	15 P фосфор 30,98 8 5	16 S сера 32,066 8 6	17 Cl хлор 35,457 8 7	18 Ar аргон 39,944 8 8
4	19 K калий 39,096 8 8 1	20 Ca кальций 40,08 8 8 2	21 Sc скандий 45,10 8 9 2	22 Ti титан 47,90 8 10 2	23 V ванадий 50,95 8 11 2	24 Cr хром 52,01 8 13 1	25 Mn марганец 54,93 8 13 2	VIII: 26 Fe железо 55,85 8 14 2; 27 Co кобальт 58,94 8 15 2; 28 Ni никель 58,69 8 16 2
	29 Cu медь 63,54 18 1	30 Zn цинк 65,38 18 2	31 Ga галлий 69,72 18 3	32 Ge германий 72,60 18 4	33 As мышьяк 74,91 18 5	34 Se селен 78,96 18 6	35 Br бром 79,916 18 7	36 Kr криптон 83,7 18 8
5	37 Rb рубидий 85,48 8 18 8 1	38 Sr стронций 87,63 8 18 8 2	39 Y иттрий 88,92 8 18 9 2	40 Zr цирконий 91,22 8 18 10 2	41 Nb ниобий 92,91 8 18 12 1	42 Mo молибден 95,95 8 18 13 1	43 Tc технеций [98] 8 18 14 2	VIII: 44 Ru рутений 101,7 8 18 15 1; 45 Rh родий 102,91 8 18 16 1; 46 Pd палладий 106,7 8 18 18
	47 Ag серебро 107,880 18 18 8 1	48 Cd кадмий 112,41 18 18 8 2	49 In индий 114,76 18 18 8 3	50 Sn олово 118,70 18 18 8 4	51 Sb сурьма 121,76 18 18 8 5	52 Te теллур 127,61 18 18 8 6	53 J иод 126,92 18 18 8 7	54 Xe ксенон 131,3 18 18 8 8
6	55 Cs цезий 132,91 8 18 18 8 1	56 Ba барий 137,36 8 18 18 8 2	57-71 La лантан 138,92 8 18 18 9 2	72 Hf гафний 178,6 8 18 32 10 2	73 Ta тантал 180,88 8 18 32 11 2	74 W вольфрам 183,92 8 18 32 12 2	75 Re рений 186,31 8 18 32 13 2	VIII: 76 Os осмий 190,2 8 18 32 14 2; 77 Ir иридий 193,1 8 18 32 15 2; 78 Pt платина 195,23 8 18 32 16 1
	79 Au золото 197,2 18 32 18 8 1	80 Hg ртуть 200,61 18 32 18 8 2	81 Tl таллий 204,39 18 32 18 8 3	82 Pb свинец 207,21 18 32 18 8 4	83 Bi висмут 209,00 18 32 18 8 5	84 Po полоний 210 18 32 18 8 6	85 At астатин [210] 18 32 18 8 7	86 Rn радон 222 18 32 18 8 8
7	87 Fr франций [223] 8 18 32 18 8 1	88 Ra радий 226,05 8 18 32 18 8 2	89- Ac актиний 227 8 18 32 18 9 2	90 Th торий 232,12 8 18 32 18 10 2				

ЛАНТАНИДЫ (ЛАНТАНОИДЫ)

58 Ce церий 140,13 8 20 8 2	59 Pr празеодим 140,92 8 21 8 2	60 Nd неодим 144,27 8 22 8 2	61 Pm прометий [147] 8 23 8 2	62 Sm самарий 150,43 8 24 8 2	63 Eu европий 152,0 8 25 8 2	64 Gd гадолиний 156,9 8 25 9 2	65 Tb тербий 159,2 8 27 8 2	66 Dy диспрозий 162,46 8 28 8 2	67 Ho гольмий 164,94 8 29 8 2	68 Er эрбий 167,2 8 30 8 2	69 Tu тулий 169,4 8 31 8 2	70 Yb иттербий 173,04 8 32 8 2	71 Lu лютеций 174,99 8 32 9 2

АКТИНИДЫ (АКТИНОИДЫ)

90 (Th) 8 18 32 18 10 2	91 Pa протактиний 231 8 18 32 20 9 2	92 U уран 238,07 8 18 32 21 9 2	93 Np нептуний [237] 8 18 32 22 9 2	94 Pu плутоний [244] 8 18 32 24 8 2	95 Am америций [243] 8 18 32 25 8 2	96 Cm кюрий [245] 8 18 32 25 9 2	97 Bk берклий [249] 8 18 32 27 8 2	98 Cf калифорний [249] 8 18 32 28 8 2	99 E эйнштейний 8 18 32 29 8 2	100 Fm фермий 8 18 32 30 8 2	101 Mv менделевий 8 18 32 31 8 2	102	103

Примечания: 1. В центре каждой клетки помещен символ химического элемента; ниже символа помещено русское название, а выше – порядковый номер элемента; ниже названия приведен атомный вес элемента, сбоку химического символа, вдоль вертикальной границы клетки, указано распределение электронов в электронной оболочке атома элемента. В квадратных скобках приведены массовые числа наиболее устойчивых изотопов искусственных радиоактивных элементов. Целое число без скобок означает массовое число наиболее распространенного изотопа природного радиоактивного элемента.

2. Положение тория в периодической системе в настоящее время недостаточно определенно, т.е. не ясно, считать ли торий актинидом или элементом IV группы.

3. Названия и химические обозначения элементов с порядковыми номерами 99, 100, 101 пока не могут считаться твердо установленными.

4. В ряде руководств элемент №86 называется нитон, известны радиоактивные изотопы этого элемента: торон–220, актинон–219 и наиболее устойчивый из них радон–222.

Новейшие исследования дают основание помещать в то же место, где находится актиний (№ 89), все элементы с бо́льшими порядковыми номерами, т. е. торий (№ 90), протактиний (№ 91), уран (№ 92) и т. д. Аналогично лантанидам (правильнее „лантаноидам") — элементам с номерами 58, 59, . . . , 71—элементы с номерами 90, 91,..., 100 называют актинидами (правильнее „актиноидами"). В обычной периодической таблице элементы, расположенные один над другим, образуют группу. К первой группе относятся левые концы всех периодов — щелочные металлы и водород (есть основание помещать водород в седьмую группу над фтором) и элементы медь (Cu), серебро (Ag), золото (Au), принадлежащие серединам больших периодов; во второй группе располагаются щелочноземельные металлы и цинк, кадмий, ртуть — элементы, принадлежащие серединам больших периодов, и т. д. Номер группы равен высшей степени окисления элемента (высшей положительной валентности). Неметаллические свойства элементов при переходе по таблице справа налево и сверху вниз становятся менее ярко выраженными, а металлические свойства, напротив, усиливаются.

Периодическая система не только классифицирует элементы, но и дает возможность сделать предсказания о свойствах еще не открытых элементов. На основании таких предсказаний были открыты технеций (№ 43), прометий (№ 61), астатин (№ 85), франций (№ 87), так как место в таблице характеризует свойства занимающего его элемента.

Творец периодической системы Д. И. Менделеев предсказал свойства не известных еще тогда элементов — галлия (экаалюминий), скандия (экабор), германия (экасилиций), технеция (экамарганец), рения (двимарганец), астатина (экаиод), открытых после этих предсказаний. Периодическая система (табл. 1) принадлежит к величайшим достижениям науки и является основой современной химии и атомной физики.

СТРОЕНИЕ АТОМОВ И АТОМНЫЕ КОНСТАНТЫ

[7], [8], [10], [13], [19], [21], [30], [32], [35]

По современным воззрениям атом представляет собой сложную электрическую систему — малое по объему в сравнении с объемом атома атомное ядро, окруженное электронной оболочкой из электронов, число которых таково, что их общий отрицательный заряд по абсолютной величине равен положительному электрическому заряду ядра атома.

Масса электронов значительно меньше массы ядра; последняя почти равна вследствие этого массе атома.

Проблема строения атома состоит из двух основных вопросов — структуры атомного ядра и структуры электронной оболочки.

Вопрос о строении атомного ядра играет основную роль в учении о радиоактивности, т. е. самопроизвольном распаде атомных ядер, в проблеме практического использования атомной (точнее, ядерной) энергии и в искусственном превращении химических элементов.

Строение электронной оболочки атома тесно связано с оптическими свойствами атомов (включая рентгеновы характеристические лучи), с химическим поведением элементов, с энергетическими уровнями атомов, с их магнитными свойствами, фотоэффектом, периодическим законом и периодической системой Д. И. Менделеева и т. д.

Физический атомный вес M — число, показывающее, во сколько раз масса данного атома больше $^1/_{16}$ части массы атома наиболее легкого изотопа кислорода.

Химический атомный вес — число, показывающее, во сколько раз средняя масса атома данного элемента больше $^1/_{16}$ части средней массы атома природного кислорода.

Массовое число A — целое число, ближайшее к атомному весу.

Так как обычный кислород состоит из атомов, имеющих массовые числа 16 (99,76%), 17 (0,04%) и 18 (0,20%), то физический атомный вес элемента в 1,000275 раза больше химического атомного веса; химический атомный вес элемента равен 0,999725 физического атомного веса; масса наиболее легкого изотопа кислорода по физической шкале принята равной 16,00000, по химической же шкале она равна 15,9956.

Строение атомного ядра. Согласно общепринятой теории советского ученого Иваненко ядро всякого атома состоит из *протонов* и *нейтронов* (объединяемых общим названием *нуклонов*).

Протон — ядро атома водорода, имеющее положительный заряд, равный

по абсолютной величине заряду электрона, и массовое число 1.

Нейтрон — материальная частица с массовым числом 1, не имеющая электрического заряда.

Если в ядро атома входит Z протонов (обусловливающих собой положительный заряд ядра) и N нейтронов, то $Z + N = A$.

Атом и ядро обозначаются химическим символом элемента с указанием порядкового номера (приписываемого обычно слева внизу) и массового числа (приписываемого обычно справа вверху), например $_{92}U^{238}$.

Атомы, различающиеся массовыми числами и характеризующиеся одним и тем же порядковым номером, называются *изотопами*; атомы с одним и тем же массовым числом, но с разными порядковыми номерами, называются *изобарами*.

Различают стабильные атомные ядра и неустойчивые, претерпевающие одно из пяти превращений [10], [19], [21], [40]:

альфа-распад — разложение ядра, сопровождающееся выбросом альфа-частицы, т. е. ядра атома гелия $_2He^4$, и образованием нового ядра с массовым числом, меньшим на 4 единицы, и порядковым номером, меньшим на 2 единицы по сравнению с исходным ядром;

бэта (—) распад — разложение ядра, сопровождающееся выбросом бэта (—) частицы, т. е. электрона ($_{-1}e^0$), и образованием нового ядра с тем же массовым числом, как у исходного ядра, но с порядковым номером, большим на 1;

k-захват — захват атомным ядром электрона из электронной оболочки, сопровождающийся образованием нового ядра с тем же массовым числом, как у исходного ядра, но с порядковым номером, меньшим на 1;

бэта (+) распад — разложение ядра, сопровождающееся выбросом бэта (+) частицы, т. е. позитрона ($_{+1}e^0$), и образованием нового ядра с тем же массовым числом, как у исходного ядра, но с порядковым номером, меньшим на 1;

расщепление (деление) ядра — разложение ядра на два, вообще говоря, неодинаковых, новых ядра и несколько нейтронов.

Как бэта (+), так и бэта (—) распад сопровождается выбросом нейтрино — материальной частицы, не имеющей электрического заряда и обладающей ничтожно малой массой, во всяком случае не превышающей массу электрона; по воззрениям ряда исследователей, масса покоящегося нейтрино равна нулю.

Физические константы, связанные со строением атомного ядра [40], [32]:

Скорость света в *см·сек*$^{-1}$	$c = 2{,}99776 \cdot 10^{10}$
Заряд электрона или позитрона в *абс. эл-ст. ед.*	$e = 4{,}8024 \cdot 10^{-10}$
Масса в *г* электрона или позитрона	$m_э = 9{,}107 \cdot 10^{-28}$
протона	$m_п = 1{,}6725 \cdot 10^{-24}$
атома водорода	$m_в = 1{,}6734 \cdot 10^{-24}$
нейтрона	$m_н = 1{,}6749 \cdot 10^{-24}$
Атомный вес (в физической системе):	
электрона или позитрона	$M_э = 0{,}000548$
протона	$M_п = 1{,}00758$
нейтрона	$M_н = 1{,}00893$
водорода	$M_в = 1{,}00813$
Постоянная Планка в *эрг·сек*	$h = 6{,}6242 \cdot 10^{-27}$
Постоянная Больцмана в *эрг·град*$^{-1}$	$k = 1{,}3805 \cdot 10^{-16}$
Число Авогадро в *моль*$^{-1}$	$N = 6{,}0228 \cdot 10^{23}$
Боровский радиус $\left(\frac{h^2}{4\pi^2 m_э e^2}\right)$ в *см*	$a_0 = 0{,}5292 \cdot 10^{-8}$

1 электроновольт = $1{,}6020 \cdot 10^{-12}$ *эрг* = 23,052 *ккал·моль*$^{-1}$

Строение электронных оболочек невозбужденных атомов и распределение электронов по энергетическим уровням [39], [40]. Состояние каждого электрона в атоме характеризуется значениями четырех квантовых чисел: n — главного, l — азимутального, m — магнитного и σ — спинового. Число n может принимать любое целое значение: $n = 1, 2, \ldots$; число l — целое число (включая нуль), не превышающее $(n-1)$, т. е. $l = 0, 1, \ldots, n-1$; число m может быть любым целым (включая нуль) положительным или отрицательным числом, лежащим в интервале $-l \leqslant m \leqslant +l$; число σ может иметь значение $\pm \frac{1}{2}$.

На основании принципа Паули, утверждающего невозможность наличия в атоме двух электронов с тождественными состояниями, наибольшее число электронов в атоме с данным значением главного квантового числа n равно $2n^2$. Электроны, имеющие значение главного квантового числа, равное единице, т. е. $n = 1$, называются относящимися к K-слою; $n = 2$ — к L-слою; $n = 3$ — к M-слою; $n = 4$ — к N-слою; $n = 5$ — к O-слою; $n = 6$ — к P-слою; $n = 7$ — к

Q-слою. Электроны, характеризующиеся значениями азимутального квантового числа $l=0$, $l=1$, $l=2$, $l=3$, называются соответственно *s*, *p*, *d*, *f*-электронами.

Например, обозначение электрона 2*s* показывает, что данный электрон характеризуется квантовыми числами $n=2$ и $l=0$.

Число электронов в зависимости от главного и азимутального квантовых чисел, а также обозначение слоев и электронов для всех химических элементов даны в табл. 2.

Радиусы атомов и ионов. В табл. 3 радиусы атомов и ионов даны в ангстремах (10^{-8} *см*); для радиусов ионов приведено по три значения — на основе экспериментальных данных кристаллографического анализа (эксп.) и теоретических вычислений Паулинга (П) и Захарьязена (З).

Потенциал (энергия) ионизации. Работа, необходимая для отделения и переноса электрона, принадлежащего невозбужденному атому, молекуле или иону, на большое (теоретически бесконечно большое) расстояние, представляет собой потенциал (энергию) ионизации. Обычно потенциал ионизации выражают в электроновольтах или в калориях на грамм-атом или моль. При отделении первого электрона находят первый потенциал ионизации, второго электрона — второй потенциал ионизации и т. д.

В табл. 4 приведены значения первого потенциала в *ккал/грамматом* для большинства химических элементов, в табл. 5 — потенциалы ионизации молекул в электроновольтах.

Потенциалы ионизации разных порядков. В табл. 6 величина потенциала ионизации водорода принята за единицу; порядок потенциала ионизации указывается индексом.

Сродство атомов к электрону и электроотрицательность. Энергия, выделяемая при образовании отрицательного иона, когда свободный электрон присоединяется к нейтральному атому, называется *сродством к электрону* и выражается либо в электроновольтах, либо в *ккал/грамматом*.

Экспериментальные данные сродства к электрону в *ккал/грамматом*: F — 95; Cl — 86; Br — 84; J — 76; O — 71.

Теоретическая оценка сродства атома к электрону в *ккал/грамматом* дана в в табл. 7.

Электроотрицательностью атома называют его тенденцию образовывать отрицательно заряженный ион. Мерой электроотрицательности атома часто считают сумму потенциала ионизации I и электронного сродства E.

Электроотрицательность атомов $(I+E)$ в *ккал/грамматом*: F — 510; Cl — 385; Br — 349; J — 318; H — 328; Li — 135.

Теоретическая оценка при помощи термохимических данных электроотрицательности атомов в относительных единицах при условии, что для фтора электроотрицательность принята равной 4:

H — 2,1				
Li — 1	Na — 0,9	K — 0,8	Rb — 0,8	Cs — 0,7
Be — 1,5	Mg — 1,2	Ca — 1,0	Sr — 1,0	Ba — 0,9
B — 2,0	Al — 1,5	Sc — 1,3	Y — 1,3	
C — 2,5	Si — 1,8	Ti — 1,6	Zr — 1,6	
		Ge — 1,7	Sn — 1,7	
N — 3,0	P — 2,1	As — 2,0	Sb — 1,8	
O — 3,5	S — 2,5	Se — 2,4	Te — 2,1	
F — 4,0	Cl — 3,0	Br — 2,8	J — 2,4	

Радиоактивные изотопы, применяемые в качестве радиоактивных индикаторов

В табл. 8 приведены данные, характеризующие наиболее часто применяемые радиоактивные изотопы.

Верхний правый индекс у символа химического элемента обозначает массовое число атома, левый — тип радиоактивности, — (минус) означает распад с выбросом электрона, + (плюс) означает распад с выбросом позитрона, *k* — захват ядром электрона из электронной оболочки; *V* — энергия, выделяемая при аннигиляции позитрона с электроном и равная 1,02 *Мев* (1 *Мев* обозначает один миллион электроновольт); буквы *d*, *p*, *n*, γ, *e*, α означают соответственно дейтерон, протон, нейтрон, γ-квант, электрон, α-частицу, т. е. ядро атома гелия; запись ядерной реакции, например, $Cl^{35}(n, p)$, означает $Cl^{35} + n = S^{35} + p$; $Au^{197}(n, \gamma)$ означает $Au^{197} + n = Au^{198} + \gamma$; $\varnothing$ — обозначение деления ядра; Pd^{111} (26 мин. e^-) — означает, что Ag^{111} образуется при радиоактивном β-распаде Pd^{111}.

Приведенный в табл. 8 список применяемых при различных исследованиях радиоактивных изотопов далеко не полон; в нем не указан ряд изотопов, образующихся в атомном котле в результате деления U^{235} и Pu^{239} и выделяемых химическими методами при изолировании плутония 239 [35], [10].

Таблица 2

Числа электронов

Порядковый номер химического элемента	Название химического элемента	Химический символ элемента	Число электронов																	
			$n=1$	$n=2$		$n=3$			$n=4$				$n=5$				$n=6$			$n=7$
			K	L		M			N				O				P			Q
			$l=0$	$l=0$	$l=1$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=0$
			$1s$	$2s$	$2p$	$3s$	$3p$	$3d$	$4s$	$4p$	$4d$	$4f$	$5s$	$5p$	$5d$	$5f$	$6s$	$6p$	$6d$	$7s$
1	Водород	H	1																	
2	Гелий	He	2																	
3	Литий	Li	2	1																
4	Бериллий	Be	2	2																
5	Бор	B	2	2	1															
6	Углерод	C	2	2	2															
7	Азот	N	2	2	3															
8	Кислород	O	2	2	4															
9	Фтор	F	2	2	5															
10	Неон	Ne	2	2	6															
11	Натрий	Na	2	2	6	1														
12	Магний	Mg	2	2	6	2														
13	Алюминий	Al	2	2	6	2	1													
14	Кремний	Si	2	2	6	2	2													
15	Фосфор	P	2	2	6	2	3													
16	Сера	S	2	2	6	2	4													
17	Хлор	Cl	2	2	6	2	5													
18	Аргон	Ar	2	2	6	2	6													
19	Калий	K	2	2	6	2	6		1											
20	Кальций	Ca	2	2	6	2	6		2											
21	Скандий	Sc	2	2	6	2	6	1	2											
22	Титан	Ti	2	2	6	2	6	2	2											
23	Ванадий	V	2	2	6	2	6	3	2											
24	Хром	Cr	2	2	6	2	6	5	1											
25	Марганец	Mn	2	2	6	2	6	5	2											
26	Железо	Fe	2	2	6	2	6	6	2											
27	Кобальт	Co	2	2	6	2	6	7	2											
28	Никель	Ni	2	2	6	2	6	8	2											
29	Медь	Cu	2	2	6	2	6	10	1											
30	Цинк	Zn	2	2	6	2	6	10	2											
31	Галлий	Ga	2	2	6	2	6	10	2	1										
32	Германий	Ge	2	2	6	2	6	10	2	2										
33	Мышьяк	As	2	2	6	2	6	10	2	3										
34	Селен	Se	2	2	6	2	6	10	2	4										
35	Бром	Br	2	2	6	2	6	10	2	5										
36	Криптон	Kr	2	2	6	2	6	10	2	6										
37	Рубидий	Rb	2	2	6	2	6	10	2	6			1							
38	Стронций	Sr	2	2	6	2	6	10	2	6			2							
39	Иттрий	Y	2	2	6	2	6	10	2	6	1		2							
40	Цирконий	Zr	2	2	6	2	6	10	2	6	2		2							
41	Ниобий	Nb	2	2	6	2	6	10	2	6	4		1							
42	Молибден	Mo	2	2	6	2	6	10	2	6	5		1							
43	Технеций	Tc	2	2	6	2	6	10	2	6	6		1							
44	Рутений	Ru	2	2	6	2	6	10	2	6	7		1							
45	Родий	Rh	2	2	6	2	6	10	2	6	8		1							
46	Палладий	Pd	2	2	6	2	6	10	2	6	10									
47	Серебро	Ag	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1							
48	Кадмий	Cd	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2							
49	Индий	In	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	1						
50	Олово	Sn	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	2						

Продолжение табл. 2

Порядковый номер химического элемента	Название химического элемента	Химический символ элемента	Число электронов																					
			$n=1$	$n=2$		$n=3$			$n=4$				$n=5$				$n=6$			$n=7$				
			K	L		M			N				O				P			Q				
			$l=0$	$l=0$	$l=1$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=0$	$l=1$	$l=2$	$l=0$				
			$1s$	$2s$	$2p$	$3s$	$3p$	$3d$	$4s$	$4p$	$4d$	$4f$	$5s$	$5p$	$5d$	$5f$	$6s$	$6p$	$6d$	$7s$				
51	Сурьма	Sb	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	3										
52	Теллур	Te	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4										
53	Иод	J	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	5										
54	Ксенон	Xe	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6										
55	Цезий	Cs	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			1							
56	Барий	Ba	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			2							
57	Лантан	La	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1		2							
58	Церий	Ce	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	2	6			2							
59	Празеодим	Pr	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6			2							
60	Неодим	Nd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6			2							
61	Прометий	Pm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	5	2	6			2							
62	Самарий	Sm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6			2							
63	Европий	Eu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6			2							
64	Гадолиний	Gd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	1		2							
65	Тербий	Tb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	8	2	6	1		2							
66	Диспрозий	Dy	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6			2							
67	Гольмий	Ho	2	2	6	2	6	10	2	6	10	11	2	6			2							
68	Эрбий	Er	2	2	6	2	6	10	2	6	10	12	2	6			2							
69	Тулий	Tu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6			2							
70	Иттербий	Yb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6			2							
71	Лютеций	Lu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1		2							
72	Гафний	Hf	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	2		2							
73	Тантал	Ta	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	3		2							
74	Вольфрам	W	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	4		2							
75	Рений	Re	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	5		2							
76	Осмий	Os	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	6		2							
77	Иридий	Ir	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	7		2							
78	Платина	Pt	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	9		1							
79	Золото	Au	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		1							
80	Ртуть	Hg	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2							
81	Таллий	Tl	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	1						
82	Свинец	Pb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	2						
83	Висмут	Bl	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	3						
84	Полоний	Po	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	4						
85	Астатин	At	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	5						
86	Нитон	Nt	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6						
87	Франций	Fr	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		1				
88	Радий	Ra	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		2				
89	Актиний	Ac	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	1	2				
90	Торий	Th	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	2	2				
91	Протактиний	Pa	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	2	2	6	1	2				
92	Уран	U	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	3	2	6	1	2				
93	Нептуний	Np	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	5	2	6		2				
94	Плутоний	Pu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	6	2	6		2				
95	Америций	Am	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6		2				
96	Кюрий	Cm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6	1	2				

Таблица 3

Радиусы атомов и ионов

Символ элемента	Радиус атома	Ион	Радиус иона			Межатомное расстояние (длина химической связи)
			эксп.	П	З	
H	0,37	H^-	1,27	2,08	1,36	—
Ne	1,60	—	—	—	—	—
Ar	1,91	—	—	—	—	—
Kr	2,0	—	—	—	—	—
Xe	2,2	—	—	—	—	—
Li	1,50	Li^+	0,78	0,60	0,68	—
Be	1,1112	Be^{2+}	0,34	0,31	0,39	—
B	~0,7	B^{3+}	—	0,20	0,24	—
C	0,77	$C-O\left(CO_3^{2-}\right)$	—	—	—	1,31
N	0,53	$N-O\left(NO_3^-\right)$	—	—	—	1,23
		N^{3-}	—	1,71	—	—
O	—	O^{2-}	1,32	1,40	1,40	—
F	0,68	F^-	1,33	1,36	1,33	—
Na	1,86	Na^+	0,98	0,95	0,98	—
Mg	1,595	Mg^{2+}	0,78	0,65	0,71	—
Al	1,48	Al^{3+}	0,57	0,50	0,55	—
Si	1,172	Si^{4+}	0,39	0,41	0,44	—
		$Si-O\left(SiO_3^{2-}\right)$	—	—	—	1,63
P (черный)	1,08	$P-O\left(PO_4^{3-}\right)$	—	—	—	1,56
		P^{3-}	—	2,12	—	—
S (ромбическая)	1,06	$S-O\left(SO_4^{2-}\right)$	—	—	—	1,49
		S^{2-}	1,74	1,84	1,85	—
Cl	0,97	$Cl-O\left(ClO_3^-\right)$	—	—	—	1,45
		Cl^-	1,81	1,81	1,81	—
K	2,27	K^+	1,33	1,33	1,33	—
Ca	1,97	Ca^{2+}	1,06	0,99	0,98	—
Sc	—	Sc^{3+}	0,83	0,81	0,78	—
Ti	1,45	Ti^{4+}	0,64	0,68	0,62	—
V	1,313	V^{4+}	0,61	—	—	—
Cr (α)	1,246	Cr^{3+}	0,65	—	—	—
Cr (β)	1,35	—	—	—	—	—
Mn (α)	1,24	Mn^{2+}	0,91	—	—	—
Mn (β)	1,26	Mn^{4+}	0,52	—	—	—
Mn (γ)	1,29	—	—	—	—	—
Fe (α)	1,238	Fe^{2+}	0,83	—	—	—
Fe (β)	1,26	Fe^{3+}	0,67	—	—	—
Co	1,25	Co^{2+}	0,82	—	—	—
Ni	1,243	Ni^{2+}	0,78	—	—	—
Cu	1,275	Cu^+	~1,0	0,96	—	—
Zn	1,329	Zn^{2+}	0,83	0,74	—	—
Ga	1,22	Ga^{3+}	0,62	0,62	—	—
Ge	1,22	Ge^{4+}	0,44	0,53	—	—
As	1,25	$As-O\left(AsO_3^{3-}\right)$	—	—	—	2,01
		As^{3-}	—	2,22	—	—
Se	1,16	Se^{2-}	1,91	1,98	1,96	—

Продолжение табл. 3

Символ элемента	Радиус атома	Ион	Радиус иона			Межатомное расстояние (длина химической связи)
			эксп.	П	З	
Br	11,3	Br — O (BrO_3^-)	—	—	—	1,68
		Br^-	1,96	1,95	1,96	—
Rb	2,43	Rb^+	1,49	1,48	1,48	—
Sr	2,14	Sr^{2+}	1,27	1,13	1,15	—
Zr	1,58	Zr^{4+}	0,87	0,80	0,79	—
Mo	1,36	Mo^{4+}	0,68	—	—	—
Ru	1,322	Ru^{4+}	0,65	—	—	—
Rh	1,342	Rh^{3+}	0,69	—	—	—
Pd	1,372	—	—	—	—	—
Ag	1,441	Ag^+	1,13	1,26	—	—
Cd	1,486	Cd^{2+}	1,03	0,97	—	—
Sn (белое)	1,508	Sn^{4+}	0,74	0,71	—	—
Sb	1,439	Sb — O (SbO_3^{3-})	—	—	—	2,22
		Sb^{3-}	—	2,45	—	—
Te	1,44	Te^{4+}	0,89	—	—	—
		Te^{2-}	2,11	2,21	2,18	—
J	1,35	J^-	2,20	2,16	1,19	—
Cs	2,62	Cs^+	1,65	1,69	1,67	—
Ba	2,17	Ba^{2+}	1,43	1,35	1,31	—
La	1,86	La^{3+}	1,22	1,15	1,06	—
Ce	1,81	Ce^{4+}	1,02	1,01	0,89	—

Таблица 4

Первые потенциалы ионизации

I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			0
Ia	Iб	IIa	IIб	IIIa	IIIб	IVa	IVб	Va	Vб	VIa	VIб	VIIa	VIIб				
H 312																	He 563,8
Li 123,5		Be 213,8		B 190,1		C 258,3		N 333,4		O 312,2		F 414,7					Ne 494,4
Na 117,7		Mg 175,3		Al 137,3		Si 186,6		P 253,4		S 237,5		Cl 298,6					Ar 361,5
K 99,5		Ca 140,3			Sc 154		Ti 156,9		V 155,7		Cr 155,3		Mn 170,5	Fe 180,4	Co 195,8	Ni 175,3	
	Cu 176,9		Zn 215,6	Ga 137,5		Ge 186,4		As 241,9		Se 223,5		Br 265					Kr 321,2
Rb 95,8		Sr 130,6			Y 150		Zr 159,4		Nb —		Mo 165,9		Tc —	Ru 177	Rh 177,4	Pd 191,2	
	Ag 173,7		Cd 206,4	In 132,7		Sn 168,2		Sb 192,4		Te 206,4		J 241,9					Xe 278,3
Cs 89,2		Ba 119,6			La 128,8		Hf —		Ta —		W 186,6		Re —	Os 200,4	Ir —	Pt 204,6	
	Au 211,7		Hg 239,1	Tl 139,8		Pb 170		Bi 167,0									
Fr —		Ra 121			Ac —		Th —										

Таблица 5

Потенциалы ионизации молекул в электроновольтах

Вещество	Измеренная минимальная величина	Предполагаемый процесс	Вычисленная минимальная величина	Вещество	Измеренная минимальная величина	Предполагаемый процесс	Вычисленная минимальная величина
H_2	15,8	$H_2 \rightarrow H_2^+$	15,4	C	—	$C \rightarrow C^+$	11,2
	18,0	$H_2 \rightarrow H^+ + H$	17,9	CH_4	14,5	$CH_4 \rightarrow CH_4^+$	—
O_2	12,5	$O_2 \rightarrow O_2^+$	11,7	C_2H_6	12,8	—	—
	20,0	$O_2 \rightarrow O^+ + O$	18,7	C_2H_4	12,2	—	—
H_2O	13,0	$H_2O \rightarrow H_2O^+$	—	C_2H_2	12,3	—	—
	17,3	$H_2O \rightarrow OH^+ + H$	—				
	19,2	$H_2O \rightarrow OH + H^+$	18,4	C_6H_6	9,6	—	—
Cl_2	13	—	—				
				C_7H_8	8,5	—	—
HCl	13,8	$HCl \rightarrow HCl^+$	—				
				C_8H_{10}	10,0	—	—
Br_2	12	—	—				
				CO	14,1	$CO \rightarrow CO^+$	12,9
HBr	13,2	—	—		22	$CO \rightarrow C^+ + O$	21
J_2	9,7	$J_2 \rightarrow J_2^+ + J$	—		24	$CO \rightarrow C + O^+$	23,7
	9,7	$J_2 \rightarrow J^+ J$	—		44	$CO \rightarrow CO^{2+}$	44
HJ	12,8	—	—	CO_2	14,4	$CO_2 \rightarrow CO_2^+$	—
H_2S	10,4	$H_2S \rightarrow H_2S^+$	—				
	16,9	—	—		19,6	$CO_2 \rightarrow CO + O^+$	19,0
	15,8	—	—		20,4	$CO_2 \rightarrow CO^+ + O$	19,7
					28,3	$CO_2 \rightarrow C^+ + O + O$	26,7
N_2	15,8	$N_2 \rightarrow N_2^+$	15,8				
	24,5	$N_2 \rightarrow N^+ + N$	22,7	$C_4H_{10}O$	13,6	—	—
NH_3	11,2	$NH_3 \rightarrow NH_3^+$	—	$CHCl_3$	11,5	—	—
	12,0	—	—	C_2N_2	13,5	$C_2N_2 \rightarrow C_2N_2^+$	—
	11,2	—	—		18	$C_2N_2 \rightarrow CN + CN^+$	—
NO	9,5	$NO \rightarrow NO^+$	9,4		17	$C_2N_2 \rightarrow C_2^+ + N_2$	—
	21	$NO \rightarrow N + O^+$	19,3.				
	22	$NO \rightarrow N^+ + O$	20,2		22,5	$C_2N_2 \rightarrow C^+ + C + N_2$	20,4
NO_2	11	$NO_2 \rightarrow NO_2^+$		HCN	15	$HCN \rightarrow HCN^+$	—
	—	$NO_2 \rightarrow NO^+ + O$	12,7	$ZnCl_2$	12,9	—	—
	17,7	$NO_2 \rightarrow NO + O^+$	16,9				
	—	$NO_2 \rightarrow N + O_2^+$	17,4	$Zn(C_2H_5)_2$	12	—	—
	20,8	$NO_2 \rightarrow N^+ + O_2$	1,84	$HgCl_2$	12,1	—	—

Таблица 6

Потенциалы ионизации разных порядков

Символ элемента	Порядковый номер	Обозначение внешних электронов	Потенциалы ионизации разных порядков							
			I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8
H	1	s	1,00							
He	2	s^2	1,80	4,0						
Li	3	s	0,4	5,6	9,0					
Be	4	s^2	0,7	1,34	11,3	16				
B	5	s^2p	0,61	1,85	2,8	19,3	25			
C	6	s^2p^2	0,83	1,79	3,52	4,74	29,0	36		
N	7	s^2p^3	1,07	2,18	3,49	5,43	7,19	40,5	49	
O	8	s^2p^4	1,0	2,58	4,04	5,69	8,07	10,14	54,5	64
F	9	s^2p^5	1,33	2,57	4,62	6,40	7,56	11	13,60	70
Ne	10	s^2p^6	1,58	3,02	4,67					
Na	11	s	0,38	3,5	5,24					
Mg	12	s^2	0,56	1,10	5,89					
Al	13	s^2p	0,44	1,38	2,09	9,0				
Si	14	s^2p^2	0,60	1,20	2,46	3,32	12,47			
P	15	s^2p^3	0,81	1,46	2,22	3,53	4,78			
S	16	s^2p^4	0,76	1,72	2,58	3,48	4,93	6,47		
Cl	17	s^2p^5	0,96	1,73	2,93	3,50	5,00	6,8	8,0	
Ar	18	s^2p^6	1,16	2,05	3,01	12,6				
K	19	s	0,32	2,34	3,47					
Ca	20	s^2	0,45	0,87	3,76					
Sc	21	s^2d	0,49	0,95	1,82	5,33				
Ti	22	s^2d^2	0,50	1,00	2,03	3,18	7,07			
V	23	s^2d^3	0,5	1,04	1,95	3,59	5,05	9,05		
Cr	24	sd^5	0,5	1,23	2,0	3,7	5,4			
Mn	25	s^2d^5	0,55	1,16	2,4	3,72	5,6			

Таблица 7

Сродство атома к электрону E

Подгруппы									
Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	0	Iб	IIб
H—16,4 Li—12 Na—5	Be—14 Mg—21	B—3 Al—2	C—21 Si—14	N —17 P—5	S—48	Fe—94 Cl—85	He—0 Ne—28 Ar—23	Cu—23 Ag—26 Au—56	Hg—42

Таблица 8

Радиоактивные изотопы, применяемые в качестве радиоактивных индикаторов

Название элемента	Активный изотоп	Период полураспада *	Максимальная энергия в миллионах электроновольт		Ядерная реакция, приводящая к образованию активного изотопа
			β излучения	γ излучения	
Водород . . .	$-H^3$	12,5 лет	0,018	—	Li^6 (n, α)
Углерод . . .	$+C^{11}$	20,5 мин.	0,99	V	B^{10} (d, n); B^{11} (p, n)
	$-C^{14}$	$57 \cdot 10^3$ лет	0,155	—	N^{14} (n, p)
Азот	$+N^{13}$	10,0 мин.	1,20	V; 0,285	C^{12} (d, n); N^{14} $(n, 2n)$
Фтор	$+F^{18}$	107 мин.	0,64	V	O^{17} (d, n); O^{18} (p, n); Ne^{20} (d, α); F^{19} $(n, 2n)$
Натрий	$-Na^{24}$	14,8 часа	1,4	1,4—3,1	Na^{23} (d, p); Na^{23} (n, γ); Al^{27} (n, α)
	$+Na^{22}$	2,6 года	0,58	V; 1,28	Mg^{24} (d, α)

* Период полураспада — отрезок времени, в течение которого из первоначального числа атомных ядер распадается половина.

Продолжение табл. 8

Название элемента	Активный изотоп	Период полураспада *	Максимальная энергия в миллионах электроновольт		Ядерная реакция, приводящая к образованию активного изотопа
			β излучения	γ излучения	
Магний	$-Mg^{27}$	9,7 мин.	1,8	0,88	Mg^{26} (d, p); Mg^{26} (n, γ); Al^{27} (n, p)
Кремний	$-Si^{31}$	170 мин.	1,8	—	Si^{30} (d, p); P^{31} (n, p)
Фосфор	$-P^{32}$	14,30 дня	1,7	—	P^{31} (n, γ); P^{31} (d, p); S^{32} (n, p)
Сера	$-S^{35}$	87,1 дня	0,167	—	Cl^{35} (n, p)
Хлор	$-Cl^{36}$	$4{,}5 \cdot 10^5$ лет	0,65	—	Cl^{35} (n, γ)
	$-Cl^{38}$	38,6 мин.	5	1,65; 2,15	Cl^{37} (d, p); Cl^{37} (n, γ)
Калий	$-K^{42}$	12,4 часа	3,5	1,5—2,1	K^{41} (d, p); Sc^{45} (n, α)
Кальций	$-Ca^{45}$	180 дней	0,19 (95%) 0,91 (5%)	0,71	Ca^{44} (d, p); Sc^{45} (n, p)
Марганец	$+Mn^{57}$	5,8 часа	0,58—2,66	0,73—1,46	Fe^{54} (d, α)
	$^kMn^{54}$	310 дней	1,0	0,85	Fe^{56} (d, α)
Железо	$-Fe^{59}$	46 дней	0,46	1,3	Fe^{58} (d, p); Co^{59} (n, p)
Кобальт	$+Co^{56}$	80 дней	1,5	0,85—325	Fe^{56} $(d, 2n)$
	$+Co^{58}$	70 дней	1,36	0,81	Fe^{57} (d, n)
	$-Co^{60}$	5,08 лет	0,31—1,42	1,2—1,3	Co^{59} (n, γ)
Медь	$\pm{}^kCu^{64}$	12,9 часа	0,6	V	Cu^{63} (d, p); Cu^{63} (n, γ)
Цинк	$+Zn^{65}$	250 дней	0,33	1,12	Cu^{65} $(d, 2n)$
Мышьяк	$-As^{76}$	26,8 дня	3,04	V; 1,5—3,5	As^{75} (d, p); As^{75} (n, γ)
Бром	$-Br^{82}$	34 дня	0,47	0,65	Br^{81} (d, p); Br^{81} (n, γ)
Стронций	$-Sr^{89}$	54,5 дня	1,46	—	Sr^{88} (d, p); Sr (n, γ)
Молибден	$-Mo^{99}$	67 час.	1,03	0,4	Mo^{98} (d, p); Mo^{98} (n, γ); U $(n, \varnothing)$
Серебро	$-Ag^{111}$	7,6 дня	0,8	—	Pd^{110} (d, n); Pd^{111} (26 мин. e^-) Pd^{108} (α, p)
Иод	$-J^{128}$	25,0 мин.	1,85	0,4	J^{127} (n, γ)
	$-J^{130}$	12,6 часа	1,03	0,42—0,74	Te^{130} $(d, 2n)$
	$-J^{131}$	8 дней	0,69	0,4	Te^{130} (d, n); Te^{131} (25 мин. e^-)
Барий	$-Ba^{133}$	38 час.	—	0,28	Cs^{137} $(d, 2n)$; Ba^{132} (n, γ)
Вольфрам	$-W^{187}$	24,1 часа	1,33	0,9	W^{186} (n, γ)
Иридий	$-Ir^{194}$	19 час.	2,2	0,2—1,5	Ir^{193} (n, γ)
Золото	$-Au^{198}$	67,8 часа	0,8	0,4	Au^{197} (n, γ)
Ртуть	$-Hg^{203}$	43,5 дня	1,62	0,007—0,41	Hg^{202} (d, p); Hg^{202} (n, γ)

* Период полураспада — отрезок времени, в течение которого из первоначального числа атомных ядер распадается половина.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗЕЙ ДВУХАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ

Под величиной энергии связи (табл. 9) понимают работу, необходимую для отделения обоих атомов друг от друга из молекулы, в которой они были химически связаны между собой; энергия связи равна той энергии, которая выделится при соединении двух свободных атомов в молекулу. Энергию связи обычно выражают или в электроновольтах, или в больших калориях на грамм-молекулу [8], [35].

СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ВАЖНЕЙШИХ СОЕДИНЕНИЙ [3], [29], [31], [35], [34], [39], [42], [43], [44], [45]

В табл. 10 приводятся данные, которые характеризуют основные свойства простых веществ (элементов в свободном виде) и их важнейших соединений.

Численные значения плотности приводятся для комнатной температуры (15—20°), если нет специальных указа-

ний в скобках; например, 5,6 $\frac{(18)}{4}$ означает, что плотность вещества 5,6 отнесена к воде при 4° и соответствует 18°; плотности газов отнесены к воздуху или водороду, что указывается буквами (В) и (Н) в скобках. Данные о температурах плавления и кипения отнесены к давлению 760 *мм* рт. ст.; сокращения „разл." и „возг." означают, что плавление или кипение сопровождается разложением или возгонкой; в некоторых случаях приводится температура кипения для давления, отличного от нормального, например, 82 (15 *мм*); в отдельных случаях, кроме температуры плавления, дается точка перехода (т. п.) в другую кристаллическую модификацию.

Таблица 9

Энергия связей двухатомных молекул в *ккал/моль*

Молекула	Энергия связи	Молекула	Энергия связи	Молекула	Энергия связи	Молекула	Энергия связи
AgBr	60	Cd_2	2,1	JCl	49,63	RbBr	90,1
AgCl	71	CdBr	65	JnBr	(74)	RbCl	101,0
AgJ	51	CdCl	51	JnCl	(104)	RbF	124
AgH	53	CdJ	32	JnH	58	RbJ	75,8
AgO	32	CdH	15,63	JnJ	(62)	RbH	39
AlBr	(55)	CdS	90	JnO	25	S_2	101
AlCl	(71)	CdSe	174	K_2	11,8	SO	(119,5)
		CeO	150	KBr	90,6	Sb_2	69
AlF	(41)	Cl_2	57,08			SbBi	69
AlH	67	ClF	60,31	KCl	101,4	SbCl	85
AlO	(87	ClO	44	KF	129	SbF	(92)
AlJ	67	CrO	74	KH	42,9	SbH	(71)
As_2	90,8	Cs_2	10,4	KJ	76,4	SbO	74
AsN	115	CsBr	92,9	LaO	161	ScO	138
AsO	113	CsCl	103	Li_2	26	Se_2	65
AuCl	65	CsF	124	LiBr	104,5	SeO	81
AuH	69	CsH	41	LiCl	118,5	SiBr	69
B_2	69	CsJ	78	LiF	145	SiCl	76
BBr	95	CuBr	62	LiH	58	SiF	88
BCl	81	CuCl	69	LiJ	83	SiN	104
BF	(104)	CuF	69	MgBr	58	SiO	(184)
BH	69	CuH	62	MgCl	62	SiS	147
BN	92	CuJ	44	MgF	74	SiTe	(115)
BO	161	CuO	104	MgH	46	SnBr	46
BaCl	46	F_2	50	MnH	(55)	SnCl	74
BaF	69	FeCl	69	MnO	92	SnF	76
BaH	41	FeO	(92)	N_2	225,1	SnH	(74)
BaO	108	GaBr	(81)	NBr	(58)	SnO	74
BaS	53	GaCl	(85)	NH	78	SnS	67
		GaJ	66	NO	150	SnSe	60
BeCl	(69)			NS	115	SnTe	39
BeF	92	GaO	58	Na	17,8	SrCl	(58)
BeH	53	GdO	115	NaBr	88,3	SrF	62
BeO	101	GeBr	58	NaCl	97,7	SrH	38,0
Bl_2	39,6	GeCl	62	NaF	115	SrJ	(46)
BlBr	63,2	GeO	127	NaJ	71,7	SrO	104
BiCl	67	GeS	115	NaH	47	SrS	(53)
BiF	74	GeSe	88	NaK	14,3	Te_2	53
BiH	58			NaRb	13,1	TeO	62,82
		GeTe	67	NiCl	115	TlCl	(18)
BiJ	58			NiH	60	TlO	127
BiO	92	H_2	103,2	O_2	117,2	TlBr	74
Br_2	45,44	HBr	87,4	OH	101	TlCl	87
BrCl	52,1	HCl	102,1	P_2	116	TlF	108
C_2	(83)	HF	145	PN	138	TlH	46
CH	80,0	HU	71,6	PO	143		
CO	(256,1)	Hg_2	1,4	Pb_2	14	YO	127
CP	138	HgBr	17	PbBr	51	YO	161
CS	166	HgCl	25	PbCl	60	Zn_2	(6)
CSe	115	HgF	32	PbF	74	ZnCl	58
CaCl	(63,6)	HgH	8,57	PbH	41	ZnH	19,5
CaF	(72,6)	HgJ	7	PbO	75,9	ZnJ	41
CaH	(39,2)	HgS	64	PbS	69		
CaJ	58	HgSe	(62)	PbSe	81	ZnS	97
CaO	136	J_2	35,55	PbTe	81	ZnTe	48
CaS	115	JBr	41,89	Rb_2	11,1	ZrO	150

Таблица 10

Свойства элементов в свободном виде и их соединений

Название элемента или соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Цвет	Агрегатное состояние	Кристаллографическая система	Плотность	Температура в °С	
							плавления	кипения
Азот	N_2	28,02	Бесцветный	Газ	Кубическая	1,026 (—252,5) 0,808 (—195,8)	—209,86	—195,8
закись	N_2O	44,02	»	»	—	—	—102,3	—90,7
окись	NO	30,01	»	»	—	1,0367 (В)	—161	—151
двуокись	$2NO_2 \rightleftarrows N_2O_4$	92,02	Бурый (NO_2), бесцветный (N_2O_4)	»	—	—	— 9,3	21,3
трехокись	N_2O_3	76,02	Красно-коричневый газ, синяя жидкость	Жидкость	—	1,447 (О)	—102	3,5
пятиокись	N_2O_5	108,02	Белый	—	Ромбическая	1,63	30	47
азотистоводородная кислота	N_3H	43,03	Бесцветный	Жидкость	—	—	—80	37
азотная кислота	HNO_3	63,02	»	»	—	1,502	—42	86
Алюминий	Al	26,97	Серебристый	—	Кубическая	2,70	660	2056
азотнокислый гидрат	$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	375,14	Бесцветный	—	Ромбическая	—	73	Разл. 134
бромистый гидрат	$AlBr_3 \cdot 6H_2O$	374,82	»	—	—	—	Разл. 100	—
бромистый	$AlBr_3$	266,72	Белый	—	Триклинная	3,01 $\left(\frac{25}{4}\right)$	97,5	268
гидроокись	$Al(OH)_3$	77,99	»	—	Моноклинная	2,42	Разл. 300	—
иодистый	AlJ_3	407,73	Красный	—	—	3,98	191	382
карбид	Al_4C_3	143,91	Белый	—	Гексагональная	2,95	Разл. >2200	—
нитрид	AlN	81,96	Желтый	—	»	3,05 $\left(\frac{25}{4}\right)$	2150 (4 *ат*)	Разл. >2400
окись	Al_2O_3	101,94	Белый	—	Триклинная	4,00	1999—2032	2210
сернистый	Al_2S_3	150,12	Желтый	—	Гексагональная	2,02 $\left(\frac{13}{4}\right)$	1118	Возг. 1550 в N_2
сернокислый	$Al_2(SO_4)_3$	342,12	Белый	—	—	2,71	Разл. 770	—
сернокислый гидрат	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666,41	Бесцветный	—	Моноклинная	1,69	Разл. 86,5	—
квасцы	$Al_2K_2(SO_4)_4 \cdot 24H_2O$	948,76	»	—	Кубическая	1,76 $\left(\frac{26}{4}\right)$	92	—
квасцы	$Al_2(NH_4)_2(SO_4)_4 \cdot 24H_2O$	906,64	»	—	»	1,64 $\left(\frac{20}{4}\right)$	93,5	—
фтористый	AlF_3	83,97	»	—	Триклинная	2,88 (25)	1040	—
то же, криолит	$AlF_3 \cdot 3NaF$	209,96	Белый	—	Моноклинная	2,90	1000	—
хлористый	$AlCl_3$	133,34	»	—	Гексагональная	2,44 $\left(\frac{25}{4}\right)$	194 (2,5 *ат*)	182,7 (752 *мм*), возг. 178
то же, гидрат	$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	241,44	Бесцветный	—	Триклинная	—	—	—
Аммиак	NH_3	17,03	»	Газ	—	0,817 (—79) 0,5971 (В)	—77,7	—33,4

Аммоний азотистокислый	NH_4NO_2	64,05	Белый (светло-желтый	—	—	1,69	Разл.	—
азотнокислый	NH_4NO_3	80,05	Бесцветный	—	Ромбическая или моноклинная	1,725 $\left(\frac{25}{4}\right)$	169,6	Разл. 210
бромистый	NH_4Br	97,96	"	—	Кубическая	2,327 $\left(\frac{15}{4}\right)$	Возг. 542	—
иодистый	NH_4J	144,96	"	—	"	2,511	Возг. 551	—
молибденовокислый	$(NH_4)_6 \cdot Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$	1235,95	"	—	Моноклинная	—	—	—
персульфат	$(NH_4)_2S_2O_8$	228,20	Белый	—	"	1,98	Разл. 120	—
роданистый	NH_4CNS	76,12	Бесцветный	—	"	1,305	149,6	Разл. 170
сернокислый	$(NH_4)_2SO_4$	132,14	"	—	Ромбическая	1,769 $\left(\frac{20}{4}\right)$	Разл. 513	—
углекислый	$(NH_4)_2CO_3 \cdot H_2O$	114,11	"	—	—	—	Разл. 58	—
фосфорнокислый (однозамещенный)	$NH_4H_2PO_4$	115,04	"	—	Моноклинная	1,803 $\left(\frac{19}{4}\right)$	—	—
фосфорнокислый (двузамещенный)	$(NH_4)_2HPO_4$	132,07	"	—	"	1,619	—	—
фтористый	NH_4F	37,04	"	—	Гексагональная	—	—	—
хлористый	NH_4Cl	53,50	Белый	—	Кубическая	1,53	Разл. 350	Возг. 520
двухромовокислый	$(NH_4)_2Cr_2O_7$	252,10	Оранжевый	—	Моноклинная	2,15	Разл. 185	—
Аргон	Ar	39,94	Бесцветный	Газ	—	1,402 (—185,7) 1,38 (В)	—189,2	—185,7
Барий	Ba	137,36	Серебристо-белый	—	Кубическая	3,5	850	1140
азотнокислый	$Ba(NO_3)_2$	261,38	Бесцветный	—	"	3,244 (23)	592	Разл.
гидрат перекиси	$BaO_2 \cdot 8H_2O$	313,49	Белый	—	Гексагональная	—	—	—
то же окиси	$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	315,50	Бесцветный	—	Моноклинная	2,188	77,9	Разл. 550
гидроокись	$Ba(OH)_2$	171,38	"	—	"	4,495	—	—
окись	BaO	153,36	"	—	Кубическая	5,72	1923	2000
перекись	BaO_2	169,36	Серый или белый	Порошок	—	4,958	Разл. при кр. калении	—
сернокислый	$BaSO_4$	233,42	Бесцветный	—	Ромбическая	4,499	Разл. 1580	—
углекислый	$BaCO_3$	197,37	Белый	—	Ромбическая или гексагональная	4,29	1740 (90 *ат*) (т. п. 811, 982)	—
хлористый	$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	244,31	Бесцветный	—	Моноклинная	3,097 $\left(\frac{24}{4}\right)$	Разл. 100	—
Бериллий	Be	9,02	Серый	Металл	Гексагональная	1,816	1284	2767
окись	BeO	25,02	Белый	—	"	3,02 (0)	2585	3900
хлористый	$BeCl_2$	79,93	"	—	—	1,899 $\left(\frac{25}{4}\right)$	440	520
карбид	Be_2C	30,05	Желтый	—	Гексагональная	1,9	Разл. >2100	—
Бор	B	10,82	Серый или черный	—	Аморфная или моноклинная	2,32	2300	2550
карбид	B_4C	55,29	Черный	—	—	2,54	2450	> 3500
окись	B_2O_3	69,64	Бесцветный	Стекло	—	1,85	577	> 1500
Бром	Br_2	159,83	Красный	Жидкость	—	3,119	—7,2	58,78
Ванадий	V	50,95	Серый	Металл	Кубическая	5,96	1710	3000
карбид	VC	62,96	—	—	—	5,36	2830	3900
нитрид	VN	64,96	Красный	—	—	5,63	2050	—

Продолжение табл. 10

Название элемента или соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Цвет	Агрегатное состояние	Кристаллографическая система	Плотность	Температура в °С	
							плавления	кипения
силицид	VSi_2	107,07	—	Порошок	—	4,42	1655	—
	V_2Si	129,96	Серебристый	»	—	5,48	—	—
сернистый	V_2S_3	198,08	Черный	»	—	4,7 (21)	—	—
трехокись	V_2O_3	149,90	»	—	—	4,87 $\left(\frac{18}{4}\right)$	1970	—
пятиокись	V_2O_5	181,90	Красно-желтый	—	Ромбическая	3,357 $\left(\frac{18}{4}\right)$	800	Разл. 1750
Висмут	Bi	209,00	Серебристо-белый или красноватый	—	Гексагональная	9,80	271	1450
гидроокись	$Bi(OH)_3$	260,02	Белый	—	Аморфная	4,36	Разл. 100	—
окись	Bi_2O_3	466,0	Желтый	—	Квадратная, кубическая, ромбическая	8,55; 8,20; 8,9	860; 704; 820	1900
Висмут сернистый	Bi_2S_3	514,18	Черный	—	Ромбическая	7,00	685	—
хлористый	$BiCl_3$	315,37	Белый	—	—	4,75	230	447
Вода	H_2O	18,016	Бесцветный	Жидкость	Гексагональная	1,00 (4) 0,915 (лед)	0	100
тяжелая	D_2O	20,029	»	»	—	1,107	3,82	101,42
Водород	H_2	2,016	»	Газ	Кубическая	Жидк. 0,0709 Газ 0,06948 (В)	−259,1	−252,7
бромистый	HBr	80,92	»	»	—	2,71 (В)	−86	−67
иодистый	HJ	127,93	»	»	—	4,4 (В)	−50,8	−35,5
перекись	H_2O_2	34,02	»	Жидкость	—	1,438 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−0,89	151,4
фтористый	$HF(H_2F_2)$	20,01	»	Газ	—	0,988 (13, 6)	−83	19,4
хлористый	HCl	36,47	»	Газ или жидкость	—	1,268 (В)	−111	−85
цианистый (синильная кислота)	HCN	27,03	»	Газ	—	0,697	−14	26
Вольфрам	W	183,92	Серый	—	Кубическая	19,3	3370	5900
карбид	WC	195,93	»	Порошок	»	15,7	2777	6000
	W_2C	379,85	»	—	—	16,06	2877	6000
двуокись	WO_2	215,92	Красный	—	Кубическая	12,11	—	—
трехокись	WO_3	231,92	Желтый	—	Ромбическая	7,16	> 2130	—
силицид	W_2Si_3	452,02	Серый	Порошок	—	10,9	—	—
Гадолиний	Gd	156,9	—	—	—	—	—	—
Галлий	Ga	69,72	Серый	—	Квадратная	5,885 (24)	29,75	1700
Гафний	Hf	178,6	—	—	Гексагональная	12,1	> 1700	> 3200
Гелий	He	4,00	Бесцветный	Газ	—	0,1368 (В)	< −272,2	−268,9
Германий	Ge	72,60	Серый	—	Кубическая	5,36	958,5	2700
двуокись	GeO_2	104,60	Бесцветный	—	Ромбическая	4,703	1100	—
хлористый	$GeCl_4$	214,43	—	Жидкость	—	1,874 $\left(\frac{25}{25}\right)$	−49,5	86,5

Гидразин	N_2H_4	32,05	Бесцветный	Жидкость	—	1,011 $\left(\frac{15}{4}\right)$	1,4	113,5
Гидроксиламин	NH_2OH	33,03	—	—	Ромбическая	1,35	34	56,5 (22 *мм*)
Гольмий	Ho	169,94	—	—	—	—	—	—
Дейтерий (тяжелый водород)	D_2	4,028	Бесцветный	Газ	—	2,0 (H)	−254,6	−249,7
Диспрозий	Dy	162,46	—	—	—	—	—	—
Европий	Eu	152,0	—	—	—	—	—	—
Железо	Fe	55,85	Серый	—	Кубическая	7,86	1535	3000
гидрат закиси	$Fe(OH)_2$	89,87	Светлозеленый	—	—	3,4	—	—
гидрат окиси	$Fe(OH)_3$	106,87	Красный	—	—	3,4—3,9	—	—
закись	FeO	71,85	Черный	—	—	5,7	1420	—
закись-окись	Fe_3O_4	231,55	»	—	Кубическая	5,2	1538	—
карбонил	$Fe(CO)_5$	195,90	Светложелтый	Жидкость	—	1,457 (21)	−21	102,5
окись	Fe_2O_3	159,70	Красный или черный	—	Триклинная	5,12	1560	—
сернистое	FeS	87,91	Черный	—	Гексагональная	4,84	1193	—
сернокислое гидрат	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278,02	—	—	Моноклинная	1,899	64	Разл.
двусернистое	FeS_2	119,98	Желтый	—	Кубическая	5,0	1170	—
углеродистое (карбид)	Fe_3C	179,56	—	—	—	7,4	1837	—
хлористое	$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	198,83	Сине-зеленый	—	Моноклинная	1,926	—	—
хлорное	$FeCl_3$	162,22	Черно-коричневый	—	Гексагональная	2,804 (11)	282	315
то же гидрат	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	270,32	—	—	—	—	37	280
арсенид	FeAs	130,76	Серебристый	—	—	7,83	1020	—
	$FeAs_2$	205,67	»	—	Кубическая	7,38	990	—
нитрид	Fe_2N	125,71	Серый	—	—	6,35	Разл. > 560	—
фосфид	FeP	96,83	—	—	—	5,2 $\left(\frac{20}{4}\right)$	—	—
	Fe_2P	142,68	Серый	—	—	5,74	1290	—
силицид	FeSi	83,91	Желто-серый	—	Кубическая	6,1 $\left(\frac{20}{4}\right)$	—	—
Золото	Au	197,20	Желтый	—	»	19,3	1063	2600
хлорное	$AuCl_3$	303,57	Красный	—	—	3,9	—	Возг. 265
Индий	In	114,76	—	—	Квадратная	7,3	155	1450
Иод	J_2	253,84	Фиолетовый	—	Ромбическая	4,93	113,5	184,35
пятиокись	J_2O_5	333,84	Белый	—	—	4,799 $\left(\frac{25}{4}\right)$	Разл. 300	—
Иридий	Ir	193,10	»	—	Кубическая	22,4	2350	> 4800
Иттербий	Yb	173,04	—	—	—	—	—	—
Иттрий	Y	88,92	Темносерый	—	Гексагональная	5,51	1490	2500
Кадмий	Cd	112,41	Серебристый	—	»	8,65	320,9	767
окись	CdO	128,4	Бурый	—	Кубическая	8,15	—	—
сернистый	CdS	144,47	Желто-оранжевый	—	Гексагональная	4,58	1750 (100 *am*)	Возг. в N_2 при 980
сернокислый	$CdSO_4 \cdot {}^8/_3H_2O$	256,51	Бесцветный	—	Моноклинная	3,09	—	—
цианистый	$Cd(CN)_2$	164,45	—	—	—	—	Разл. > 200	—
Калий	K	39,10	Серебристый	—	Кубическая	Жидк. 0,83 (62) Твер. 0,86 (20)	62,3	760

Продолжение табл. 10

Название элемента или соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Цвет	Агрегатное состояние	Кристаллографическая система	Плотность	Температура в °С	
							плавления	кипения
азотистокислый	KNO_2	85,10	Бесцветный	—	—	1,915	387	Разл. 350
азотнокислый	KNO_3	101,10	»	—	Ромбическая, гексагональная	2,11 (10,6)	333 (т. п. 129)	Разл. 400
бромистый	KBr	119,01	»	—	Кубическая	2,75 (25)	730	1380
гидрат окиси	KOH	56,10	Белый	—	Ромбическая	2,044	380	1320
иодистый	KJ	166,02	»	—	Кубическая	3,13	723	1330
иодноватокислый	KJO_3	214,02	Бесцветный	—	Моноклинная	3,89	560	—
марганцовокислый	$KMnO_4$	158,03	Фиолетовый	—	Ромбическая	2,703	Разл. <240	—
окись	K_2O	94,19	Белый	—	Кубическая	2,32 $\left(\frac{20}{4}\right)$	—	—
перекись	K_2O_2	110,19	»	—	Аморфная	—	—	—
роданистый	KCNS	97,17	Бесцветный	—	Моноклинная	1,886	172,3	Разл. 500
сернистый	K_2S	110,25	»	—	—	1,805	471	—
сернокислый	K_2SO_4	174,25	»	—	Ромбическая	2,662	1067 (т. п. 588)	—
надсернокислый	$K_2S_2O_8$	270,31	Белый	—	Гексагональная	—	Разл. <100	—
углекислый (поташ)	K_2CO_3	138,20	»	—	—	2,29	891	Разл.
фтористый	KF	58,10	Бесцветный	—	Кубическая	2,48	880	1500
хлористый	KCl	74,56	»	—	»	1,988	790	1500
хлорноватокислый	$KClO_3$	122,56	»	—	Моноклинная	2,32	368	Разл. 400
хромовокислый пиро (двухромовокислый)	$K_2Cr_2O_7$	294,21	Оранжевый	—	Моноклинная, триклинная	2,69	398 (т. п. 236)	Разл.
цианистый	KCN	65,11	Белый	—	Кубическая	1,52	634,5	—
Кальций	Ca	40,08	Серебристый	—	»	1,55	810	1200±30
гидрат окиси	$Ca(OH)_2$	74,10	Бесцветный	—	Гексагональная	2,2	Разл. 580	—
окись	CaO	56,08	»	—	Кубическая	3,32	2570	2850
перекись	$CaO_2 \cdot 8H_2O$	216,21	Белый	—	Квадратная	—	Разл. 100	—
сернистый	CaS	72,14	Бесцветный	—	Кубическая	2,8	—	—
сернокислый (ангидрид)	$CaSO_4$	136,14	»	—	Ромбическая или моноклинная	2,96	1450 (мн) (т. п. 1193)	—
сернокислый гидрат (гипс)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	172,17	»	—	Моноклинная	2,32	Разл. 128	—
углекислый	$CaCO_3$	100,09	»	—	Ромбическая, гексагональная	2,93; 2,711	Разл. 825 1339 (103 *am*)	—
углеродистый (карбид)	CaC_2	64,10	Серый	—	Ромбическая	2,22	2300	—
фосфид	Ca_3P_2	182,20	Красный	—	—	2,51	>1600	—
фосфорнокислый	$Ca_3(PO_4)_2$	310,20	Белый, аморфный	—	Аморфный	3,14	1670	—
фтористый	CaF_2	78,08	Белый	—	Кубическая	3,180	1330	—
хлористый	$CaCl_2$	110,99	»	—	»	2,152	772	>1600
цианамид	$CaCN_2$	80,11	»	—	Ромбическая	—	—	—

Кислород	O_2	32,00	Бесцветный	Газ	Гексагональная	1,14 (—183) 1,426 (—252)	—218,4	—183
озон	O_3	48,00	»	»	—	1,71 (—183)	—251	—112
Кобальт	Co	58,94	Серебристый	—	Кубическая	8,9	1480	2900
гидрат закиси	$Co(OH)_2$	92,96	Красный	—	Ромбическая	3,597	Разл.	—
гидрат окиси	$Co(OH)_3$	109,96	Черный	—	—	—	Разл. 100	—
закись	CoO	74,94	Коричневый	—	Кубическая	5,68	Разл. 1800	—
закись-окись	Co_3O_4	240,82	Черный	—	»	6,07	—	—
карбонил	$Co_2(CO)_8$	341,96	Оранжевый	—	—	1,73	51	Разл.
окись	Co_2O_3	165,88	Черный	—	—	5,18	Разл. 900	—
сернистый	CoS	91,00	Коричнево-черный	—	—	5,45	> 1100	—
сернокислый	$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	281,11	Красный	—	Моноклинная	1,948 (25)	96,8	Разл.
силицид	CoSi	87,00	—	—	—	6,30 $\left(\frac{20}{4}\right)$	—	—
фосфид	CO_2P	148,86	—	—	—	6,4	—	—
Кремний	Si	28,06	Серый	—	Кубическая	2,4	1420	2600
	Si	28,06	Коричневый	—	Аморфная	2	—	—
водородистый	SiH_4	32,09	Бесцветный	Газ	—	0,68 (—185)	—185	—112
карбид (карборунд)	SiC	40,07	Черно-синий	—	Гексагональная	3,17	> 2700	—
двуокись (кварц)	SiO_2	60,06	Бесцветный	—	»	2,650	т. п. 1425	—
кристобалит	SiO_2	60,06	»	—	Кубическая или квадратная	2,32	1710	2230
тридимит	SiO_2	60,06	»	—	Ромбическая	2,26	т. п. 1670	—
фтористый	SiF_4	104,06	»	Газ	—	3,57 (В)	—95,7	—65 (1810 *м.м*)
хлористый	$SiCl_4$	169,89	»	Жидкость	—	1,50	—70	57,6
Криптон	Kr	83,70	»	Газ	—	2,818 (В)	—169	—151,8
Ксенон	Xe	131,30	»	»	—	Жидк.2,7 (—140), газ 4,53 (В)	—140	—109,1
Лантан	La	138,92	Серый	—	—	6,15	826	1800
Литий	Li	6,94	Серебристый	—	Кубическая	0,53	186	1336±5
Лутеций (кассиопий)	Lu(Cp)	174,99	—	—	—	—	—	—
Магний	Mg	24,32	Серебристый	—	Гексагональная	1,74	651	1110
гидрат окиси	$Mg(OH)_2$	58,34	Белый	—	»	2,4	Разл.	—
нитрид	Mg_3N_2	100,98	Зелено-желтый	—	Аморфная	—	—	—
окись	MgO	40,32	Бесцветный	—	Кубическая	3,65	2800	3600
сернокислый	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	246,49	»	—	Ромбическая	1,68	Разл. 70	—
углекислый	$MgCO_3$	84,33	Белый	—	Гексагональная	3,037	Разл. 350	—
хлористый	$MgCl_2$	95,23	Бесцветный	—	»	2,325 (25)	712	1412
Марганец	Mn	54,93	Светлосерый	—	—	7,2	1260	1900
гидрат закиси	$Mn(OH)_2$	88,95	Белый	—	Гексагональная	3,258 (13)	Разл.	—
двуокись	MnO_2	86,93	Черный	—	Ромбическая	5,026	Разл. > 230	—
закись	MnO	70,93	Серо-зеленый	—	Кубическая	5,18	1650	—
закись-двуокись	Mn_3O_4	228,79	Коричнево-черный	—	Квадратная	4,718	1705	—
карбид	Mn_3C	176,80	—	—	»	6,89 (17)	—	—
окись	Mn_2O_3	157,86	Коричнево-черный	—	Кубическая	4,81	Разл. 1080	—
сернистый	MnS	86,99	Зелено-желтый	—	—	3,99—4,04	1620 (вакуум)	—
силицид	MnSi	82,99	—	—	—	5,90	1280	—
	Mn_3Si	137,92	Серый	—	—	6,20	1316	—
	$MnSi_2$	111,05	»	—	Кубическая	5,24	—	—

Продолжение табл. 10

Название элемента или соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Цвет	Агрегатное состояние	Кристаллографическая система	Плотность	Температура в °С	
							плавления	кипения
фосфид	MnP	85,91	Серый	—	—	5,39 $\left(\frac{21}{4}\right)$	1190	—
Медь	Cu	63,57	Желто-красный	—	Кубическая	8,92	1083	2300
арсенид	Cu_3As	265,62	—	—	Гексагональная	8,0	830	—
гидрат закиси	CuOH	80,58	Желтый	—	—	3,4	Разл. 360	—
гидрат окиси	$Cu(OH)_2$	97,59	Синий	—	—	3,368	Разл.	—
закись	Cu_2O	—	Красный	-	Кубическая	6,0	1235	—
окись	CuO	79,57	Черный	—	Кубическая, гексагональная	6,40; 6,45	Разл. 1026	—
сернистая (закись)	Cu_2S	159,20		—	Ромбическая	5,6; 5,80	1100	—
то же (окись)	CuS	95,63	"	—	Гексагональная, моноклинная	4,6	т. п. 103	Разл. 220
сернокислая (медный купорос)	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	249,71	Синий	—	Триклинная	2,286	Разл. 110	—
сурьмянистая	Cu_3Sb	312,47	Серый	—	—	8,51	687	—
фосфид	Cu_3P_2	443,38	Серо-черный	—	—	6,4—6,8	—	—
	Cu_2P_2	252,67	Черный	—	—	6,35	Разл.	—
цианистая	$Cu_2(CN)_2$	179,16	Белый	—	Моноклинная	2,9	474,5	—
Молибден	Mo	95,95	Серый	—	Кубическая	10,2	2620±10	3700
двуокись	MoO_2	127,95	Сине-черный	—	Квадратная	6,44	—	—
карбид	MoC	107,96	Серый	Порошок	—	8,48	2570	—
окись	MoO_3	143,95	Бесцветный	—	Ромбическая	4,50	795	—
сернистый	MoS_2	160,07	Черный	—	Гексагональная	4,80 (14)	1185	—
фосфид	Mo_2P_2	253,94	Серый	—	—	6,17	Разл.	—
Мышьяк (кристаллический) α	As_4	299,64	—	—	Гексагональная	5,727 (14)	814 (36 *atm*)	Возг. 615
черный β	As_4	299,64	Черный	—	Аморфная	4,7	—	—
желтый γ	As_4	299,64	Желтый	—	Кубическая	2,0	—	—
двусернистый (реальгар)	As_2S_2	213,94	Красный	—	Моноклинная	α 3,506 β 3,254	т. п. 267 307	565
трехокись	As_2O_3	197,82	Бесцветный	—	Кубическая, моноклинная, аморфная	3,863 $\left(\frac{25}{4}\right)$ 3,85; 3,738	315	—
трехсернистый (аурипигмент)	As_2S_3	246,00	Красно-желтый	—	Моноклинная	3,43	300	707
Натрий	Na	22,997	Серебристый	—	Кубическая	0,97	97,5	880
азотистокислый	$NaNO_2$	69,01	Светложелтый	—	Ромбическая	2,168 (0)	271	Разл. 320
азотнокислый	$NaNO_3$	85,01	Бесцветный	—	Триклинная	2,257	308	Разл. 380
гидрат окиси	NaOH	40,00	Белый	—	—	2,130	318,4	1390
кремнекислый	Na_2SiO_3	122,05	Бесцветный	—	Ромбическая	—	1088	—
кислый углекислый	$NaHCO_3$	84,01	Белый	—	Моноклинная	2,20	Разл. 270	—
муравьинокислый	$NaHCO_2$	68,01	"	—	"	1,919	253	—
окись	Na_2O	61,99	"	—	—	2,27	Возг.	—
оловяннокислый	$Na_2SnO_3 \cdot 3H_2O$	266,74	Бесцветный	—	Гексагональная	—	Разл. 140	—
перекись	Na_2O_2	77,99	Бело-желтый	—	—	2,805	Разл.	—

серноватистокислый (гипосульфит)	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	248,19	Бесцветный	—	Моноклинная	1,685	Разл. 48	2
сернокислый гидрат	$Na_2SO_4 \cdot 7H_2O$	268,17	»	—	—	—	—	—
то же (глауберова соль)	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	322,21	»	—	Моноклинная	1,464	32,4	Разл. 100
тетраборнокислый (бура)	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	381,43	Белый	—	»	1,73	75	—
углекислый гидрат (сода)	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$	286,16	»	—	»	1,46	Разл.	—
углекислый	Na_2CO_3	106,00	»	—	—	2,533	851	Разл.
фосфорнокислый двузамещенный	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	358,17	Бесцветный	—	Моноклинная	1,52	34,6	Разл. 180
фосфорнокислый трехзамещенный	Na_3PO_4	163,97	Белый	—	—	2,537	1340	—
хлористый	NaCl	58,45	Бесцветный	—	Кубическая	2,163	800,4	1413
цианистый	NaCN	49,02	»	—	»	—	563,7	1496
Неодим	Nd	144,27	Желтоватый	—	—	6,9	840	—
Неон	Ne	20,18	Бесцветный	—	—	(ж) 1,204 (—245,9) 0,674 (В)	—248,67	—245,9
Ниобий (колумбий)	Nb(Cb)	92,91	Серо-стальной	—	—	8,4	1950	>3300
Никель	Ni	58,69	Серебристый	—	Кубическая	8,90	1452	2900
арсенид	NiAs	133,60	—	—	Гексагональная	7,57 (0)	968	—
гидрат закиси	$Ni(OH)_2$	92,7	Зеленый	—	Аморфная	4,1	—	—
гидрат окиси	$Ni(OH)_3$	109,71	Черный	—	—	—	Разл.	—
закись	NiO	74,69	Серый	—	Кубическая	7,45	—	—
закись-окись	Ni_3O_4	240,07	»	—	—	—	—	—
карбонил	$Ni(CO)_4$	170,73	Бесцветный	Жидкость	—	1,31	—25	43 (751 *мм*)
окись	Ni_2O_3	165,38	Черный	—	—	4,83	—	—
сернистый	NiS	90,75	»	—	—	4,60	797	—
сернокислый гидрат	$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	262,85	Желтый	—	Гексагональная	2,07	т. п. 53,3	Разл. 280
			Зеленый, синий	—	Моноклинная, квадратная			
то же	$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	280,86	Зеленый	—	Ромбическая	1,948	98—100	» 103
силицид	Ni_2Si	145,44	—	—	—	7,2	1309	—
фосфид	Ni_3P_2	238,03	Серый	—	—	5,99	—	—
	Ni_2P	148,36	»	—	—	6,3	1112	—
хлористый	$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	237,70	Зеленый	—	Моноклинная	—	—	—
Нитон (радон)	Nt(Rn)	222	—	Газ	—	Жидк. 5,5	—71	—62
Олово белое	Sn	118,70	Серебристый	—	Квадратная	7,31	231,85	2260
серое	Sn	118,70	»	—	Кубическая	5,75	Устойчиво от —163 до +18	—
гидрат закиси	$Sn(OH)_2$	152,72	Желтый	—	Аморфная	—	Разл. 160	—
двусернистое	SnS_2	182,82	»	—	Гексагональная	4,5	Разл.	—
закись	SnO	134,70	Черный	—	Кубическая	6,95	—	—
окись	SnO_2	150,70	Белый	—	Квадратная	7,0	1127	—
сернистое	SnS	150,76	Коричнево-черный	—	Ромбическая	5,08 (0)	880	1230
сернокислое	$SnSO_4$	214,76	Белый	—	—	—	Разл. 360	—
хлористое	$SnCl_2 \cdot 2H_2O$	225,65	»	—	Триклинная	2,71	37,7	Разл.
хлорное	$SnCl_4$	260,53	Бесцветный	Жидкость	—	2,226	—30,2	114,1

Продолжение табл. 10

Название элемента или соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Цвет	Агрегатное состояние	Кристаллографическая система	Плотность	Температура в °С	
							плавления	кипения
Осмий	Os	190,2	Синий	—	Гексагональная	22,48	2700	>5300
Палладий	Pd	106,7	Серебристый	—	Кубическая	12,0	1555	2200
Платина	Pt	195,23	»	—	»	21,45	1755	4300
хлорная	$PtCl_4$	337,06	Красный	—	Квадратная	—	Разл. 370	—
Празеодим	Pr	140,92	Желтый	—	—	6,5	940	—
Радий	Ra	226,05	Серебристый	—	—	5	960	1140
Рений	Re	186,31	—	—	Гексагональная	—	3440	—
Родий	Rh	102,91	Серо-белый	—	Кубическая	12,5	1955	>2500
Ртуть	Hg	200,61	Серебристый	Жидкость	—	13,546	—38,87	356,9
закись	Hg_2O	417,22	Черный	—	—	9,8	Разл. 100	—
окись	HgO	216,61	Желто-красный	—	Ромбическая	11,14	Разл. 100	—
сернистая	HgS	232,67	Черный	—	Аморфная	7,67	Возг. 446	—
хлористая (каломель)	Hg_2Cl_2	572,14	Белый	—	Квадратная	7,150	302	383,7
хлорная (сулема)	$HgCl_2$	271,52	»	—	Ромбическая	5,44	277	304
Рубидий	Rb	85,48	Серебристый	—	—	1,53	38,5	700
Рутений	Ru	101,70	Серый	—	Гексагональная	12,2	2450	>2700
Самарий	Sm	150,43	—	—	—	7,7	>1300	—
Свинец	Pb	207,21	Серебристый	—	Кубическая	11,337 $\left(\frac{20}{20}\right)$	327,5	1620
азид	$Pb(N_3)_2$	291,26	Бесцветный	—	—	—	Взрыв. 350	—
азотнокислый	$Pb(NO_3)_2$	331,23	»	—	Кубическая, моноклинная	4,53	Разл. 470	—
гидроокись	$Pb(OH)_2$	241,23	Белый	—	—	—	Разл. 145	—
двуокись	PbO_2	239,21	Коричневый	—	Квадратная	9,375	Разл. 290	—
окись (глет)	PbO	223,21	Желтый	—	»	9,53	888	—
окись-двуокись (сурик)	Pb_3O_4	685,63	Красный	—	Аморфная	9,1	Разл. 500	—
сернистый	PbS	239,27	Темносерый	—	Кубическая	7,5	1120	—
сернокислый	$PbSO_4$	303,27	Белый	—	Моноклинная, ромбическая	6,2	1170	—
углекислый основной	$2PbCO_3Pb(OH)_2$	775,67	»	—	Гексагональная	6,14	Разл. 400	—
уксуснокислый (свинцовый сахар)	$Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$	379,35	»	—	Моноклинная	2,55	Разл. 75	—
хромовокислый	$PbCrO_4$	323,22	Желтый	—	»	6,12	844	Разл.
Селен	Se_β	631,68	Красный	Порошок	Аморфная	4,26 (25)	50	688
	Se_γ	631,68	Серый, красный	—	Гексагональная	4,80; 4,50	220	688
	Se_α	631,68	Серо-стальной	—	»	4,8 (25)	217	688
Сера аморфная	S	32,06	Желтый	Порошок	—	2,046	120	444,6
моноклинная	S_β	256,48	»	—	Моноклинная	1,96	119,0	444,6
ромбическая	S_α	256,48	»	—	Ромбическая	2,07	112,8	444,6
двуокись	SO_2	64,06	Бесцветный	Газ	—	ж. 1,434 (О) 2,264 (В)	—75,5	—10,0
трехокись	SO_3 (α)	80,06	»	—	—	ж. 1,923	16,83	44,6
	$(SO_3)_2$(β)	160,12	»	—	—	1,97	50	—

шестифтористая	SF_6	146,06	Бесцветный	Газ	—	ж. 1,91 5,03 (В)	—55 (под давлением)	—62
хлористая	S_2Cl_2	135,03	Желто-красный	Жидкость	—	1,687	—80	138
серная кислота	H_2SO_4	98,08	Бесцветный	»	—	1,834 $\left(\frac{18}{4}\right)$	10,49	Разл. 340
сернистый водород	H_2S	34,08	»	Газ	—	1,1895 (В	—82,9	—59,6
Серебро	Ag	107,88	Серебристый	—	Кубическая	10,5	960,5	1950
азотнокислое	$AgNO_3$	169,89	Бесцветный	—	Ромбическая	4,352 $\left(\frac{19}{4}\right)$	212	Разл. 444
бромистое	AgBr	187,80	Светложелтый	—	Кубическая	6,473 $\left(\frac{25}{4}\right)$	434	Разл. 700
окись	Ag_2O	231,76	Коричневый	—	»	7,143	Разл. 300	—
сернистое	Ag_2S	247,82	Черный	—	Ромбическая, кубическая	7,326; 7,317	825	—
хлористое	AgCl	143,34	Белый	—	Кубическая	5,56	455	1550
Скандий	Sc	45,10	—	—	—	2,5	1200	2400
Стронций	Sr	87,63	Серебристый	—	—	2,6	800	1150
азотнокислый	$Sr(NO_3)_2$	211,65	Бесцветный	—	Кубическая	2,986	570	—
окись	SrO	103,63	»	—	»	4,7	2430	—
хлористый	$SrCl_2 \cdot 6H_2O$	266,64	Белый	—	Ромбическая	1,933	Разл. 61	—
Сурьма	Sb	121,76	»	—	Гексагональная	6,684 (25)	630,5	1380
гидрат окиси (сурьмянистая кислота)	$Sb(OH)_3$	172,78	»	—	Аморфная	—	Разл.	—
окись (сурьмянистый ангидрид)	Sb_2O_3	291,52	—	—	Ромбическая	5,67	656	1570
пятиокись	SbO_5	323,52	Желтый	—	—	3,78	Разл. 450	—
трехсернистая	Sb_2S_3	339,70	Черный	—	Ромбическая	4,64	550	—
фтористая	SbF_3	178,76	Бесцветный	—	»	4,379	292	Возг.
хлористая	$SbCl_3$	228,13	»	—	»	3,14	73,4	220,2
четырехокись	Sb_2O_4	307,52	Белый	Порошок	—	6,2	Разл. 1060	—
Таллий	Tl	204,39	Сине-белый	—	Квадратная	11,85	303,5	1650
закись	Tl_2O	424,78	Желтый	—	—	—	300	Разл. 1865
окись	Tl_2O_3	456,78	Коричневый Черный	—	Гексагональная	9,65 10,19	759	Разл. 875
Тантал	Ta	180,88	Серый	—	Кубическая	16,6	2850	>4100
окись (танталовый ангидрид)	Ta_2O_5	441,76	Белый	—	Ромбическая	8,735 $\left(\frac{61}{4}\right)$	1470	—
Теллур кристаллический	Te	127,61	Серый	—	Гексагональная	(α) 6,24 (β) 6,00	452	1390
Тербий	Tb	159,20	—	—	—	—	—	—
Титан	Ti	47,90	Темносерый	—	Кубическая	4,50	1800	>3000
двуокись (анатаз)	TiO_2	79,90	Коричнево-черный	—	Квадратная	3,84	—	—
двуокись (брукит)	TiO_2	79,90	»	—	Ромбическая	4,17	—	—
двуокись (рутил)	TiO_2	79,90	Бесцветный	—	Квадратная	4,26	1640	<3000
карбид	TiC	59,91	—	—	Кубическая	4,24 $\left(\frac{20}{4}\right)$	3180	4300
трехокись	Ti_2O_3	143,80	Черный или красный	—	Гексагональная	4,6	2130	—

Продолжение табл. 10

Название элемента или соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Цвет	Агрегатное состояние	Кристаллографическая система	Плотность	Температура в °С	
							плавления	кипения
четыреххлористый	$TiCl_4$	189,73	Бесцветный	Жидкость	—	1,726	—30	136,4
Горий	Th	232,12	—	—	Кубическая	11,2	1845	>3000
азотнокислый	$Th(NO_3)_4 \cdot 4H_2O$	552,22	Белый	—	—	—	Разл.	—
гидроокись	$Th(OH)_4$	300,15	»	Порошок	—	—	»	—
двуокись	ThO_2	264,12	»	—	Кубическая	9,69	>2800	4400
карбид	ThC_2	256,14	Желтый	—	—	8,96	—	—
Гулий	Tu(Tm)	169,40	—	—	—	—	—	—
Углерод (алмаз)	C	12,01	Бесцветный	—	Кубическая	3,51	>3500	4200
(графит)	C	12,01	Черный	—	Гексагональная	2,26	>3500	4200
двуокись (углекислый газ)	CO_2	44,01	Бесцветный	Газ	—	1,101 (—37) 1,56 (—79) 1,53 (В)	—56,6 (5 *am*)	Возг. —78,5
двусернистый (сероуглерод)	CS_2	76,13	»	Жидкость	—	1,261 $\left(\frac{22}{20}\right)$	—108,6	46,3
недоокись	C_3O_2	68,03	»	Газ	—	1,114 (О)	—107	7
окись	CO	28,01	»	»	—	0,968 (В)	—207	—192
четыреххлористый	CCl_4	153,84	»	Жидкость	—	1,595 $\left(\frac{20}{4}\right)$	—22,6	76,8
Уран	U	238,07	Белый	—	—	18,485 $\left(\frac{13}{4}\right)$	1133	3500
двуокись (закись)	UO_2	270,07	Черный	—	Ромбическая	10,9	2176	—
закись-окись	U_3O_7	842,21	Оливково-зеленый	—	—	7,31	Разл.	—
карбид	U_2C_3	512,14	—	—	—	11,28	2400	—
трехокись	UO_3	286,07	Желтый	Порошок	—	7,29	Разл.	—
шестифтористый	UF_6	352,07	»	—	Моноклинная	4,68 (21)	69,2 (2 *am*)	56,2
четыреххлористый	UCl_4	379,90	Серый	—	Кубическая	4,725 $\left(\frac{25}{4}\right)$	—	
уранил азотнокислый	$UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	502,18	Желтый	—	Ромбическая	2,807	60,2	118
Фосфор желтый (белый)	P_4	123,92	»	—	Гексагональная	1,82	44,1 загорается при 34	280
красный	P_4	123,92	Красный	—	Кубическая	2,20	590 (43 *am*)	725 загорается на воздухе
фиолетовый	P_4	123,92	Фиолетовый	—	Моноклинная	2,36	593	—
черный	P_4	123,92	—	—	Ромбическая	2,69	—	400 загорается на воздухе
пятиокись	P_2O_5	141,96	Белый	—	Аморфная	2,387	Возг. 250	—
трехокись	P_2O_3	109,96	»	—	Моноклинная	2,135 $\left(\frac{21}{4}\right)$	22,5	173,1
четырехокись	P_2O_4	125,96	»	—	Ромбическая	2,537 $\left(\frac{22}{4}\right)$	>100	180

пятихлористый	PCl_5	208,27	—	—	Квадратная	1,6	148 (под повышенным давлением)	Возг. 160
треххлористый	PCl_3	137,35	Бесцветный	Жидкость	—	1,574 $\left(\frac{20}{4}\right)$	—111,8	75,97
фосфористый водород (фосфин)	PH_3	34,00	—	Газ	—	1,146 (В)	—132,5	—85
фосфорная кислота (орто)	H_3PO_4	98,00	Бесцветный	—	Ромбическая	1,834	42,35	Разл. 213
Фтор	F_2	38,00	Светложелтый	Газ	—	1,31 (В)	—223	—187
Хлор	Cl_2	70,91	Желто-зеленый	»	—	2,49 (В)	—101,6	—34,6
Хром	Cr	52,01	Серый	—	Кубическая	7,1	1615	2200
арсенид	CrAs	126,92	»	—	Гексагональная	6,35	—	—
гидрат окиси	$Cr(OH)_3$	103,03	Зеленый или синий	—	—	—	—	—
карбид	Cr_3C_2	180,05	Серый	—	—	6,68	1890	3800
нитрид	CrN	66,02	—	—	Аморфная	5,8 $\left(\frac{25}{4}\right)$	Разл. 1500	—
окись	Cr_2O_3	152,02	Гемнозеленый	—	Гексагональная	5,21	1900	—
силицид	$CrSi_2$	212,15	Серый	—	Квадратная	5,6 (О)	—	—
фосфид	CrP	82,99	»	—	—	5,7	—	—
хлорный	$CrCl_3$	158,38	Фиолетовый	—	Гексагональная	2,757	—	1200, 1500
Хромовый ангидрид	CrO_3	100,01	Красный	—	Ромбическая	2,7	Разл. 197	—
Цезий	Cs	132,91	Серебристый	—	Гексагональная	1,90	28,5	670
Церий	Ce	140,13	Серо-стальной	—	Кубическая	6,9	645	1400
					Гексагональная	6,7		
азотнокислый	$Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	434,25	Бесцветный	—	—	—	Разл. 100	—
двуокись	CeO_2	172,13	Белый или светложелтый	—	Кубическая	7,3	1950	—
Цинк	Zn	65,38	Серебристый	—	Гексагональная	7,140	419,4	907
гидрат окиси	$Zn(OH)_2$	99,40	Бесцветный	—	Ромбическая	3,053	Разл. 125	—
окись	ZnO	81,38	Белый	—	Гексагональная	5,606	1800	—
сернистый (вурцит)	ZnS	97,44	»	—	»	4,087	1850 (150 *ат*)	Возг. 1185
сернистый (сфалерит)	ZnS	97,44	»	—	Кубическая	4,102 $\left(\frac{25}{4}\right)$	т. п. 1020	—
сернокислый гидрат	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	287,55	Бесцветный	—	Ромбическая	1,966	т. п. 39	—
углекислый	$ZnCO_3$	125,39	Белый	—	Гексагональная	4,42	Разл. 300	—
фосфид	Zn_3P_2	258,10	Серо-стальной	—	Кубическая	4,55 $\left(\frac{13}{4}\right)$	>420	1100
хлористый	$ZnCl_2$	136,29	Белый	—	—	2,91 $\left(\frac{25}{4}\right)$	365	732
цианистый	$Zn(CN)_2$	117,42	Бесцветный	—	Ромбическая	—	Разл. 80	—
Цирконий	Zr	91,22	—	—	Кубическая	6,4	1700	>2900
гидроокись	$Zr(OH)_4$	159,25	Белый	—	—	3,25	Разл. 550	—
двуокись	ZrO_2	123,22	»	—	Моноклинная	5,73	2700	4300
карбид	ZrC	103,23	Серый	—	—	—	—	5100
кремнекислый (циркон)	$ZrSiO_4$	183,28	Бесцветный	—	—	4,7	—	—
Эрбий	Er	167,2	Темносерый	—	—	4,77	—	—

ЭНЕРГИЯ ИОННОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Энергией ионной кристаллической решетки называют то количество работы, которое надо затратить для того, чтобы ионы из моля монокристалла отделить друг от друга и развести их на бесконечно большое расстояние.

Для энергии ионной решетки U теория дает формулы:

$$U = \frac{NAz_1z_2e^2}{r}\left(1 - \frac{1}{n}\right); \qquad (1)$$

$$U = Az_1z_2\frac{e^2}{r} - Be^{-\frac{r}{\rho}} + \frac{c}{r^6} - \varepsilon, \qquad (2)$$

где A — константа Маделунга; r — расстояние между центрами соседних ионов; z_1 и z_2 — значности ионов; e — заряд электрона; N — число Авогадро; n — величина, характеризующая силы отталкивания, связанная с сжимаемостью (k) кристалла уравнением

$$k = 18\frac{r_0^4}{Ae^2(n-1)},$$

ρ — величина, определяемая по сжимаемости кристалла, и ε — нулевая энергия. Простое выражение для энергии кристаллической ионной решетки предложено А. Ф. Капустинским:

$$U = 287{,}2\,\frac{\sum_n z_1z_2}{r_1 + r_2}\left(1 - \frac{0{,}345}{r_1 - r_2}\right),$$

где z_1 и z_2 — радиусы ионов, а $\sum_n$ — число ионов в молекуле [4], [5], [35].

Энергии решеток и их составляющие для некоторых солеобразных соединений даны в табл. 11.

Таблица 11

Энергии решеток и их составляющие для некоторых солеобразных соединений в *ккал/моль*

Соль	Кулоновская энергия $A\frac{e^2}{r}$	Энергия ван-дер-ваальсова взаимодействия	Энергия отталкивания	Нулевая энергия	Общая энергия по формуле (2)	Энергия решетки по формуле (1)	Экспериментальное значение энергии решетки	Энергия, вычисленная с помощью кругового процесса
LiF	287,7	1,30	−44,34	−3,91	240,8	255,3	—	247
LiCl	225,25	3,63	−26,99	−2,41	199,5	199,9	—	200
LiBr	209,2	3,33	−22,63	−1,60	188,3	186,0	—	189
LiJ	189,9	3,76	−18,41	−1,16	174,1	168,9	—	177
NaF	249,8	2,03	−35,54	−2,90	213,4	222,0	—	217
NaCl	205,1	2,9	−23,63	−1,74	183,1	182,7	181,3	—
NaBr	194,0	2,75	−20,72	−1,45	174,6	172,3	—	—
NaJ	179,1	2,98	−17,26	−1,16	163,7	159,1	—	—
KF	216,9	3,49	−28,33	−2,18	189,8	192,5	—	192
KCl	184,6	3,92	−21,64	−1,45	165,4	164,0	—	167
KBr	175,5	3,62	−18,70	−1,16	156,1	—	—	—
KJ	164,0	3,77	−15,97	−1,02	150,8	143,7	153,8	—
RbF	205,1	3,92	−26,40	−1,45	181,2	182,1	—	185
RbCl	177,3	4,65	−20,05	−1,16	160,7	157,2	—	163
RbBr	168,0	4,06	−18,08	−0,87	153,1	149,4	151,3	—
RbJ	157,5	4,06	−15,52	−0,73	145,3	140,0	—	—
CsF	192,4	6,53	−24,09	−0,12	174,7	170,9	—	178
CsCl	163,4	7,68	−17,81	−0,99	152,2	145,2	—	157
CsBr	157,1	6,7	−16,6	−0,73	146,5	139,4	—	149
CsJ	147,8	6,67	−14,65	−0,73	139,1	131,2	141,5	—
MgO	1107,4	1,45	−166,9	−4,4	938	—	—	—
CaO	965,7	2,9	−134,6	−2,9	831	—	—	—
SrO	877,5	2,9	−112,9	−1,45	766	—	—	—
BaO	825,5	4,35	−101,4	−1,45	727	—	—	—
MgS	905,8	2,9	−107,3	−2,9	799	—	—	—
CaS	832,6	2,9	−98,5	−1,5	735	—	—	—
SrS	771,4	2,9	−86,8	−1,5	686	—	—	—
BaS	722,4	2,9	−76,9	−1,5	647	—	—	—

ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СВОБОДНОМ ВИДЕ И НЕКОТОРЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ [3] [43]

В табл. 12 приведены удельные теплоты испарения и плавления в *кал/Г* и соответствующие температуры в градусах.

Таблица 12

Теплоты плавления и испарения

Название элемента или химического соединения	Химическая формула	Плавление		Испарение	
		Удельная теплота в *кал/Г*	Температура в °С	Удельная теплота в *кал/Г*	Температура в °С
Азот	N_2	6,09	−210	47,8	−195,6
двуокись (четырехокись)	NO_2 (N_2O_4)	32,3—37,1	−9,3	93,4	18
окись	NO	18,4	−163	—	—
пятиокись	N_2O_5	76,7	29,5	—	—
азотная кислота	HNO_3	9,544	−42	114,9	86,0
Алюминий	Al	9,3	658	2228	1800
бромистый	$AlBr_3$	10,47	97,5	—	—
Аммиак	NH_3	83,9	−77,7	327,1	−33,4
				301,6	0
Аммоний хлористый	NH_4Cl	—	—	78,9 (возг.)	350
Аргон	Ar	6,713	−189,2	37,6	−186
Барий	Ba	—	—	628,3	1140
хлористый	$BaCl_2$	27,8	962	—	—
Бериллий	Be	260	1300	—	—
Бор хлористый	BCl_3	—	—	10	38,2
Бром	Br_2	16,2	−7,2	58,78	44,8
Висмут	Bi	12,46	271	188	1450
Вода	H_2O	79,67	0	595,9	0
				539,55	100
				478,6	180
Вода тяжелая	D_2O	—	—	499	101,4
Водород	H_2	14,0	−259,1	108	−252,7
бромистый	HBr	7,67	−86	52	−66,7
иодистый	HJ	—	—	33,9	−37,2
перекись	H_2O_2	7,4	−1,7	—	—
фтористый	HF (H_2F_2)	—	—	97	19,4
хлористый	HCl	13,9	−111	105,9	−85
цианистый (синильная кислота)	HCN	—	—	210	20
Вольфрам	W	—	—	1179	5900
Галлий	Ga	19,0	30	—	—
Гелий	He	—	—	6	−268,9
Германий	Ge	—	—	1639	2700
Железо	Fe	65,0	1535	1595	3000
Золото	Au	16,11	1063	445,7	2600
Иод	J_2	15,8	113,5	41,4	184,4
Кадмий	Cd	13,17	320,9	216	767
Калий	K	14,68	62,3	511,5	760
азотнокислый	KNO_3	25,44	333	—	—
гидрат окиси	KOH	28,55	380	—	—
двухромовокислый	$K_2Cr_2O_7$	29,74	368	—	—
фтористый	KF	108	880	—	—
хлористый	KCl	74,1	790	—	—
Кальций	Ca	—	—	1170	2378,3
хлористый	$CaCl_2$	54,2	772	—	—
Кислород	O_2	3,30	−218,4	51,0	−183,0
Кобальт	Co	58,38	1480	1240	2900
Кремний	Si	—	—	144,7	2600
четыреххлористый	$SiCl_4$	10,85	−70	36,1	57
Криптон	Kr	4,3	−169	26,5	−151,8
Ксенон	Xe	3,77	−140	—	—
Литий	Li	32,81	186	2540	1200
азотнокислый	$LiNO_3$	88,51	261	—	—
Магний	Mg	70	651	2574	1100

Продолжение табл. 12

Название элемента или химического соединения	Химическая формула	Плавление		Испарение	
		Удельная теплота в *кал/Г*	Температура в °С	Удельная теплота в *кал/Г*	Температура в °С
Марганец	Mn	64,0	1260	910	1900
Медь	Cu	48,8	1083	1145	2300
Молибден	Mo	—	—	1338	3700
Мышьяк трехбромистый	$AsBr_3$	8,93	31	—	—
Натрий	Na	27,53	97,5	1015	880
азотнокислый	$NaNO_3$	45,27	308	—	—
гидрат окиси	NaOH	40,02	318,4	—	—
фтористый	NaF	186	992,2	—	—
хлористый	NaCl	123,5	804,3	—	—
Неон	Ne	2,6	—248,67	20,6	—245,9
Никель	Ni	73,8	1452	1400	2900
Нитон (радон)	Nt (Rn)	3,5	—71	19,5	—61,8
Олово	Sn	14,40	231,8	271	2260
хлорное	$SnCl_4$	8,41	—30,2	30,3	112
Осмий, четырехокись	OsO_4	13,5	40,1	—	—
Палладий	Pd	34,20	1555	—	—
Платина	Pt	24,1	1755	574	4300
Ртуть	Hg	2,79	—38,87	70,8	357
Рубидий	Rb	6,10	38,5	210,7	700
Свинец	Pb	6,32	327,5	203	1620
хлористый	$PbCl_2$	18,5	501	—	—
Селен (серый)	Se	6,7	220	93,4	688
Сера моноклинная	S	10,4	118,95	362	316
ромбическая	S	9,37	112,8	—	—
Серебро	Ag	25,2	960,5	556	1950
азотнокислое	$AgNO_3$	16,7	212	—	—
бромистое	AgBr	12,5	434	—	—
хлористое	AgCl	21,3	455	—	—
Серная кислота	H_2SO_4	24,03	10,49	122,1	326
Серы двуокись	SO_2	—	—	94,9	—10,8
				80,8	30
				70,3	60
Серы трехокись	SO_3	—	—	118,5	53
Стронций	Sr	—	—	1044	1150
хлористый	$SrCl_2$	25,6	873	—	—
Сурьма	Sb	39,4	630,5	302	1380
бромистая	$SbBr_3$	9,759	96,6	—	—
сернистая	Sb_2S_3	17,6	550	—	—
хлористая	$SbCl_3$	13,29	73,4	—	—
Таллий	Tl	7,18	303,5	—	—
бромистый	TlBr	12,7	460	—	—
хлористый	TlCl	16,6	430	—	—
Теллур	Te	7,30	—	300	1390
Титан четыреххлористый	$TiCl_4$	11,8	—30	—	—
Углерод	C	—	—	3837	4200
двуокись	CO_2	45,30	—56,2	87,2	—60
				55,0	0
				11,9	30
двусернистый	CS_2	—	—	84,1	46,25
окись	CO	8,00	—207	50,4	—192
четыреххлористый	CCl_4	—	—	46,4	76,75
Фосфор	P	5,04	44,1	287	287
треххлористый	PCl_3	—	—	51,4	78
Фтор	F_2	10,06	—223	73,7	—187
Хлор	Cl_2	23,0	—101,6	67,4	—34,6
Хром	Cr	31,75	1615	1095	2200
Цезий	Cs	3,8	28,5	128,0	670
Цинк	Zn	24,09	419,4	425	907

СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

[9], [31], [33], [34], [35], [38]

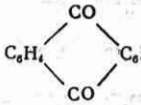
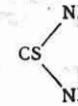
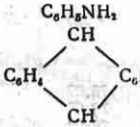
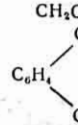
Органическими соединениями обычно называют химические соединения углерода с другими элементами.

Руководящей теорией органической химии служит структурная теория, созданная замечательным русским химиком А. М. Бутлеровым.

В табл. 13 приведены данные, которые характеризуют основные свойства органических соединений (а также окислов углерода, сернистого и хлористого углерода и карбидов металлов).

Таблица 13

Свойства органических соединений

Название соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность	Температура в °С	
				плавления	кипения
Акролеин	$CH_2=CHCHO$	56,06	$0,84\left(\frac{20}{4}\right)$	—87,7	52,5
Аланин	$CH_3CH(NH_2)CO_2H$	89,09	—	Разл. 295	Возгл. >200
Ализарин		240,06	—	289	430
Аллиловое горчичное масло	$C_3H_5N=CS$	99,15	$1,013\left(\frac{20}{4}\right)$	—80	152
Аллиловый спирт	$CH_2=CHCH_2OH$	58,08	$0,854\left(\frac{20}{4}\right)$	—129	96,6
Аллилтиомочевина (тиозинамин)		116,18	$1,219\left(\frac{20}{20}\right)$	77	—
Амиловый спирт (нормальный)	$C_5H_{11}OH$	88,15	$0,817\left(\frac{20}{20}\right)$	—	137,8
То же спирт брожения (изоамиловый)	$(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$	88,15	$0,813\left(\frac{15}{4}\right)$	—117,2	132,0
Анилин	$C_6H_5NH_2$	93,12	$1,022\left(\frac{20}{4}\right)$	—6,2	184,4
Антрацен		178,22	$1,25\left(\frac{27}{4}\right)$	217	340
Ацетальдегид	CH_3CHO	44,05	$0,783\left(\frac{18}{4}\right)$	—123,5	20,2
Ацетамид	CH_3CONH_2	59,07	1,159	81	222
Ацетилен	C_2H_2	26,04	Жидкость 0,613 (—80), газ 0,906 (В)	—81,5 (891 *мм*)	—84
Ацетил хлористый	CH_3COCl	78,50	$1,105\left(\frac{20}{4}\right)$	—112,0	81
Ацетилосалициловая кислота (аспирин)		180,15	—	135,6	—
Ацетон	CH_3COCH_3	58,08	$0,792\left(\frac{20}{4}\right)$	—94,6	56,5
Ацетоуксусная кислота	CH_3COCH_2COOH	102,09	—	—	<100
Бензальдегид	C_6H_5CHO	106,12	$1,046\left(\frac{20}{4}\right)$	—26	179
Бензидин	$H_2NC_6H_4C_6H_4NH_2$	184,23	—	128	401
Бензойная кислота	C_6H_5COOH	122,12	$1,266\left(\frac{15}{4}\right)$	121,7	249,2
Бензол	C_6H_6	78,1	$0,879\left(\frac{20}{4}\right)$	5,4	80,1
Бензофенон	$C_6H_5COC_6H_5$	182,21	1,083 (54)	48,5	305,4

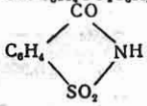
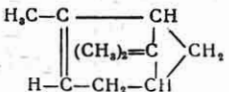
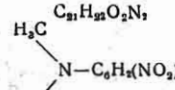
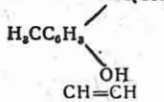
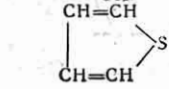
Продолжение табл. 13

Название соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность	Температура в °С	
				плавления	кипения
Бромбензол	C_6H_5Br	157,02	$1{,}495\left(\frac{20}{4}\right)$	−30,6	156,2
Бромоформ	$CHBr_3$	252,77	$2{,}890\left(\frac{20}{4}\right)$	8	150,5
Бруцин	$C_{23}H_{26}O_4N_2 \cdot 4H_2O$	466,29	—	—	—
Бутиловый спирт (норм.)	$CH_3CH_2CH_2CH_2OH$	74,12	$0{,}810\left(\frac{20}{4}\right)$	−79,9	117
Валериановая кислота	$CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$	102,13	$0{,}939\left(\frac{20}{4}\right)$	−34,5	187
Винная кислота	$(CHOHCOOH)_2$	150,09	$1{,}760\left(\frac{20}{4}\right)$	168	Разл.
Виннокислый калий кислый	$C_4H_5O_6HK$	188,18	1,956	—	—
Виннокислый калий-натрий (сегнетова соль)	$C_4H_4O_6KNa \cdot 4H_2O$	282,2	1,79	—	—
Виннокислая сурьмяно-калиевая соль (рвотный камень)	$\begin{matrix}CHOHCOOK\\ \vert\\ CH(OSbO)COOK\end{matrix} \cdot {}^1/_2H_2O$	333,94	2,60	—	—
Виноградный сахар (глюкоза)	$C_6H_{12}O_6$	180,10	1,544	146	—
Галловая кислота	$C_6H_2(OH)_3COOH \cdot H_2O$	188,13	1,70	239	Разл.
Гексан (норм.)	C_6H_{14}	86,17	$0{,}659\left(\frac{20}{4}\right)$	−94	69
Гексахлорбензол	C_6Cl_6	284,80	2,044 (24)	228	309 (742 *мм*)
Гептан (норм.)	$CH_3(CH_2)_5CH_3$	100,20	$0{,}684\left(\frac{20}{4}\right)$	−90,6	98,4
Гликоколь (глицин) (аминоуксусная кислота)	NH_2CH_2COOH	75,07	1,161	239	—
Гликолевая кислота	$CH_2OHCOOH$	76,05	—	79	Разл.
Глиоксаль	$CHOCHO$	58,04	1,14	15	51 (776 *мм*)
Глицерин	$C_3H_5(OH)_3$	92,09	$1{,}26\left(\frac{20}{4}\right)$	17,9	290
Гремучая кислота	$C{=}NOH$	43,02	—	Взрыв.	—
„ ртуть	$(CNO)_2Hg \cdot \frac{1}{2}H_2O$	284,6	4,42	Взрыв.	—
Декстрин	$(C_6H_{10}O_5)_x$	(162,14)$_x$	1,038	—	—
Диметиламин	$(CH_3)_2NH$	45,08	$0{,}680\left(\frac{0}{4}\right)$	−96	7,4
Диметилглиоксим (реактив Чугаева)	$\begin{matrix}CH_3-C-C-CH_3\\ \quad\Vert\quad\Vert\\ HO-N\quad N-OH\end{matrix}$	116,12	—	240	—
Динитробензол мета	$C_6H_4(NO_2)_2$	168,11	$1{,}575\left(\frac{20}{4}\right)$	89,8	300
„ орто	$C_6H_4(NO_2)_2$	168,11	1,59	117	319 (774 *мм*)
„ пара	$C_6H_4(NO_2)_2$	168,11	1,625	173	299 (777 *мм*)
Дифениламин	$(C_6H_5)_2NH$	169,22	$1{,}160\left(\frac{20}{20}\right)$	52,9	302
Диэтиламин	$(C_2H_5)_2NH$	73,14	$0{,}712\left(\frac{15}{15}\right)$	−38,9	55,5
Иодоформ	CHJ_3	393,78	4,008	119	Возг.
Камфора	$\begin{matrix}CH_2-CH-CH_2\\ \vert\quad\vert\quad\vert\\ \vert\quad C(CH_3)_2\quad\vert\\ \vert\quad\vert\quad\vert\\ CH_2-C(CH_3)-CO\end{matrix}$	152,23	$0{,}999\left(\frac{9}{9}\right)$	178	209,1
Крезол мета	$CH_3C_6H_4OH$	108,13	$1{,}034\left(\frac{20}{4}\right)$	10,9	202,8

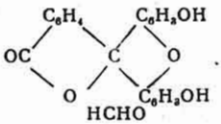
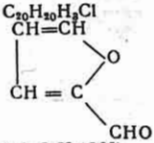
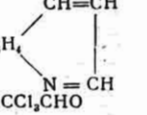
Продолжение табл. 13

Название соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность	Температура в °С	
				плавления	кипения
Крезол орто	$CH_3C_6H_4OH$	108,13	$1{,}048\left(\frac{20}{4}\right)$	30,8	190,8
» пара	$CH_3C_6H_4OH$	108,13	$1{,}035\left(\frac{20}{4}\right)$	35,6	202
Ксилол мета	$(CH_3)_2C_6H_4$	106,16	$0{,}867\left(\frac{17}{4}\right)$	−47,4	139,3
» орто	$(CH_3)_2C_6H_4$	106,16	$0{,}881\left(\frac{20}{4}\right)$	−25	144
» пара	$(CH_3)_2C_6H_4$	106,16	$0{,}861\left(\frac{20}{4}\right)$	13,2	138,5
Лимонная кислота	$C_3H_4(OH)(CO_2H)_3H_2O$	192,12	$1{,}542\left(\frac{20}{4}\right)$	153	Разл.
Малеиновая кислота	$\begin{matrix}CH-COOH\\ \|\|\\ CH-COOH\end{matrix}$	116,07	1,609	130,5	Разл. 135
Малоновая кислота	$CH_2(CO_2H)_2$	104,06	1,631	Разл. 130	–
Маннит	$C_6H_8(OH)_6$	182,17	$1{,}489\left(\frac{20}{4}\right)$	166	290
Маргариновая кислота	$C_{16}H_{33}COOH$	270,44	0,853 (60)	60	227 (100 *мм*)
Масляная кислота	$CH_3CH_2CH_2COOH$	88,10	$0{,}964\left(\frac{20}{4}\right)$	−4,7	163,5 (757 *мм*)
Меллитовая кислота	$C_6(CO_2H)_6$	342,17	—	287	—
Метан	CH_4	16,04	0,554 (В)	−182,6	−161,4
Метил иодистый	CH_3J	141,95	$2{,}279\left(\frac{20}{4}\right)$	−64,4	42,4
Метилоранж	$(CH_3)_2NC_6H_4N{=}NC_6H_4SO_3Na$	327,33	—	—	—
Метил хлористый	CH_3Cl	50,49	1,785 (В)	−97,7	−24
Молочная кислота	$CH_3CHOHCOOH$	90,08	—	52,8	—
Мочевина	NH_2CONH_2	60,06	$1{,}335\left(\frac{20}{4}\right)$	132,7	Разл.
Муравьиная кислота	$HCOOH$	46,03	$1{,}220\left(\frac{20}{4}\right)$	8,6	100,8
Нафталин	$C_{10}H_8$	128,16	$1{,}145\left(\frac{20}{4}\right)$	80,2	217,9
Нафтиламин (α)	$C_{10}H_7NH_2$	143,18	$1{,}123\left(\frac{25}{25}\right)$	50	300,8
Нафтол (α)	$C_{10}H_7OH$	144,16	1,224 (4)	96	278
Никотиновая кислота	$C_5H_4NCO_2H$	123,11	—	235,2	Возг.
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	123,11	$1{,}205\left(\frac{18}{4}\right)$	5,6	210,9
Нитроглицерин	$C_3H_5(ONO_2)_3$	227,09	1,601	13,3	160 (15 *мм*)
Нитрометан	CH_3NO_2	61,04	$1{,}138\left(\frac{20}{20}\right)$	−28,5	101,5
Нитрон	$C_{20}H_{16}N_4$	312,36	—	189	—
Октан	C_8H_{18}	114,22	$0{,}703\left(\frac{20}{4}\right)$	−56,5	125,7
Пальмитиновая кислота	$C_{15}H_{31}COOH$	256,42	$0{,}849\left(\frac{70}{4}\right)$	63	271,5 (100 *мм*)
Паральдегид	$(CH_3CHO)_3$	132,16	$0{,}994\left(\frac{20}{4}\right)$	10,5	124,4
Пентан (норм.)	C_5H_{12}	72,15	$0{,}630\left(\frac{18}{4}\right)$	−129,7	36,3
Пикриновая кислота	$HOC_6H_2(NO_2)_3$	229,11	$1{,}763\left(\frac{20}{4}\right)$	121,8	Взрыв.>300

Продолжение табл. 13

Название соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность	Температура в °С	
				плавления	кипения
Пиридин	C_5H_5N	79,10	0,982 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−42	115
Пировиноградная кислота	$CH_3COCOOH$	88,06	1,267	13,6	165
Пирогаллол	$C_6H_3(OH)_3$	126,11	1,453 (4)	133	309
Пирокатехин	$C_6H_4(OH)_2$	110,11	1,344 (4)	104	240
Пропан	C_3H_8	44,09	1,562 (В)	−187,1	−42,2
Пропиловый спирт	$C_2H_5CH_2OH$	60,09	0,804 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−127	97,8
Пропионовая кислота	C_2H_5COOH	74,08	0,992 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−22	141,1
Резорцин (мета)	$C_6H_4(OH)_2$	110,11	1,272	110,7	276,5
Роданистоводородная кислота	$HCNS$	59,09	—	5	—
Салициловая кислота (орто)	HOC_6H_4COOH	138,12	1,443 $\left(\frac{20}{4}\right)$	159	211(20 *мм*)
Салициловой кислоты фениловый эфир (салол)	$HOC_6H_4CO_2C_6H_5$	214,21	—	113	355
Сахарин (0-бензойной кислоты сульфимид)		183,18	—	225	Возг. 300 (в вакууме)
Свинец тетраметил	$Pb(CH_3)_4$	267,35	1,995 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−27,5	110
тетраэтил	$Pb(C_2H_5)_4$	323,45	1,659 $\left(\frac{18}{4}\right)$	−136	152 (291 *мм*)
Скипидар (пинен)		136,23	0,878 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−55	154
Стеариновая кислота	$C_{17}H_{35}CO_2H$	284,47	0,847 (69,3)	70	291 (110 *мм*)
Стрихнин	$C_{21}H_{22}O_2N_2$	334,19	1,350	268	270
Тетрил (тетранитрометиланилин)		287,15	1,57	129	Взрыв.
Тимол		150,21	0,972 $\left(\frac{25}{25}\right)$	51,5	232
Тиофен		84,13	1,070 $\left(\frac{15}{4}\right)$	−30	84
Толуол	$C_6H_5CH_3$	92,13	0,866 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−95	110,8
Тринитротолуол 2461	$\alpha(NO_2)_3C_6H_2CH_3$	227,13	1,654	81	Взрыв. 280
2341	$\beta(NO_2)_3C_6H_2CH_3$		1,620	112	„ 290
2451	$\gamma(NO_2)_3C_6H_2CH_3$		1,620 $\left(\frac{20}{4}\right)$	104	„ 290
Трихлоруксусная кислота	Cl_3CCOOH	163,40	1,617 $\left(\frac{46}{15}\right)$	58	195,5 (754 *мм*)

Продолжение табл. 13

Название соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность	Температура в °С	
				плавления	кипения
Уксусная кислота	CH_3COOH	60,05	$1{,}049\left(\frac{20}{4}\right)$	16,7	118,1
Уксуснокислый аммоний	CH_3COONH_4	77,08	1,073	114	Разл.
калий	CH_3COOK	98,14	1,8	292	—
натрий	CH_3COONa	82,04	1,528	324	—
свинец (свинцовый сахар)	$(CH_3COO)_2Pb\cdot 3H_2O$	379,35	2,55	—	—
уранил	$(CH_3COO)_2UO_2\cdot 2H_2O$	424,19	2,89	—	—
Уксусноамиловый эфир	$CH_3CO_2C_7H_{11}$	130,18	$0{,}879\left(\frac{20}{20}\right)$	—70,8	148,4 (737 *мм*)
Уксусноэтиловый эфир	$CH_3CO_2C_2H_5$	88,10	$0{,}901\left(\frac{20}{4}\right)$	—82,4	77,1
Уксусный ангидрид	$(CH_3CO)_2O$	102,09	$1{,}082\left(\frac{20}{4}\right)$	—73	139,6
Фенол (карболовая кислота)	C_6H_5OH	94,11	$1{,}071\left(\frac{25}{4}\right)$	42	181,4
Флуоресцеин		332,30	—	—	—
Формальдегид	$HCHO$	30,03	0,815 (—21)	—92	—21
Фосген	$COCl_2$	98,92	$1{,}392\left(\frac{19}{4}\right)$	—104	8,2
Фталевая кислота	$C_6H_4(COOH)_2$	166,13	$1{,}593\left(\frac{20}{4}\right)$	191	—
Фуксин	$C_{20}H_{20}N_3Cl$	337,84	1,220	—	—
Фурфурол		96,08	$1{,}159\left(\frac{20}{4}\right)$	—38,7	161,7
Хингидрон	$C_6H_4O_2C_6H_4(OH)_2$	218,20	1,401	171	Возг.
Хинин	$C_{20}H_{24}O_2N_2(3H_2O)$	324,21	—	57	—
Хинолин		129,15	1,095	—15	237,1 (747 *мм*)
Хлораль	CCl_3CHO	147,40	$1{,}505\left(\frac{25}{4}\right)$	—57	97,6
Хлороформ	$CHCl_3$	119,39	1,489	—63,5	61,2
Целлюлоза	$(C_6H_{10}O_5)_x$	(162,14)$_x$	1,3—1,4	—	—
Цетиловый спирт	$C_{15}H_{31}CH_2OH$	242,43	$0{,}818\left(\frac{50}{4}\right)$	49—50	189,5 (15 *мм*)
Циклогексан	C_6H_{12}	84,16	$0{,}779\left(\frac{20}{4}\right)$	6,5	80
Цинкметил	$Zn(CH_3)_2$	95,45	1,386 (11)	—40	46
Цинкэтил	$Zn(C_2H_5)_2$	123,50	1,182	—28	118
Щавелевая кислота	$H_2C_2O_4\cdot 2H_2O$	90,04	1,90	186	Возв. > 100
Эозин	$C_{20}O_5H_8Br_4$	647,93	—	—	—
Этан	C_2H_n	30,07	1,049 (В)	—172	—88,6

Продолжение табл. 13

Название соединения	Химическая формула	Молекулярный вес	Плотность	Температура в °С: плавления	Температура в °С: кипения
Этил бромистый	C_2H_5Br	109,98	1,431 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−117,8	38,4
Этилен	C_2H_4	28,05	0,975(В)	−169	−103,9
Этилена окись	$(CH_2)_2O$	44,05	0,887 $\left(\frac{7}{4}\right)$	−111,3	13,5 (747 *мм*)
Этилен бромистый	$BrCH_2—CH_2Br$	187,88	2,180 $\left(\frac{20}{4}\right)$	10	131,5
Этилендиамин	$H_2NCH_2CH_2NH_2$	60,10	0,9 $\left(\frac{20}{20}\right)$	8,5	117,2
Этилен хлористый	$ClCH_2—CH_2Cl$	98,97	1,256 $\left(\frac{20}{20}\right)$	−35,3	83,7
Этил иодистый	C_2H_5J	155,98	1,933 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−105	72,4
Этиловый спирт	C_2H_5OH	46,07	0,789 $\left(\frac{20}{4}\right)$	−112	78,4
Этил хлористый	C_2H_5Cl	64,52	0,917 $\left(\frac{6}{6}\right)$	−139	13
Янтарная кислота	$(CH_2COOH)_2$	118,09	1,572 $\left(\frac{25}{4}\right)$	189	—

Теплоты сгорания, плавления и испарения органических соединений [3], [34], [35], [36]. В табл. 14 значения теплот сгорания приведены для случая сгорания соединения при 20° и атмосферном давлении при условии, что продуктами сгорания являются жидкая вода, газообразная двуокись углерода и газообразный азот: буквами г, ж, т обозначены соответственно газообразное, жидкое и твердое агрегатные состояния. Теплота сгорания выражена в *ккал/моль*, температура — в °С. Удельная теплота плавления и удельная теплота испарения даны в *ккал/кг*. [9], [31], [33], [34], [35], [38]

Таблица 14

Теплоты сгорания, плавления и испарения органических соединений

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	Теплота сгорания в *ккал/моль*	Плавление: Удельная теплота в *ккал/кг*	Плавление: Температура в °С	Испарение: Удельная теплота в *ккал/кг*	Испарение: Температура в °С
Акролеин	CH_2CHCHO	ж	389,6	—	—	—	—
Аланин	$CH_3CH(NH_2)COOH$	т	387,7	—	—	—	—
Ализарин	$C_{14}H_6O_4(OH)_2$	»	1448,9	—	—	—	—
Аллиловый спирт	CH_2CHCH_2OH	ж	442,4	—	—	163	96
Амиловый спирт (брожения)	$C_4H_9CH_2OH$	»	793,7	—	—	—	—
Анилин	$C_6H_5NH_2$	»	811,7	21	−6,2	103,7	183
Антрацен	$C_6H_4(CH)_2C_6H_4$	т	1700,4	38,7	216,5	—	—
Ацетальдегид	CH_3CHO	ж	279,0	—	—	136	21
Ацетамид	CH_3CONH_2	т	282,6	—	—	—	—
Ацетилен	C_2H_2	г	312,0	—	—	—	—
Ацетон	CH_3COCH_3	ж	426,8	23,4	−94,6	124,5	56,1
Бензальдегид	C_6H_5CHO	»	841,3	—	—	86,5	179
Бензойная кислота	C_6H_5COOH	т	771,2	33,9	121,7	—	—
Бензол	C_6H_6	ж	782,3	30,1	5,5	94,3	80,2
Бензофенон	$C_6H_5COC_6H_5$	т	1556,5	23,5	48,5	—	—
Бутиловый спирт (норм.)	C_4H_9OH	ж	638,6	29,9	−79	141	116,8
Валериановая кислота	C_4H_9COOH	»	681,6	—	—	103,2	184,6
Винная кислота	$(CHOH)_2(COOH)_2$	т	278,4	—	—	—	—

Продолжение табл. 14

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	Теплота сгорания в ккал/моль	Плавление		Испарение	
				Удельная теплота в ккал/кГ	Температура в °С	Удельная теплота в ккал/кГ	Температура в °С
Виноградный сахар (глюкоза *d*)	$C_6H_{12}O_6$	т	673,0	—	—	—	—
Галловая кислота	$C_6H_2(OH)_3COOH$	»	633,7	—	—	—	—
Гексахлорбензол	C_6Cl_6	ж	989,8	36,7	—94	79,3	68
Гексахлорэтан	C_2Cl_6	т	509,0	—	—	—	—
Гептан (норм.)	C_7H_{16}	»	110,0	—	—	—	—
Гексан (норм.)	C_6H_{14}	ж	1149,9	33,7	—90,6	76,3	97,5
Гликоколь (глицин)	NH_2CH_2COOH	т	234,5	—	—	—	—
Гликолевая кислота	$OHCH_2COOH$	»	166,6	—	—	—	—
Глицерин	$C_3H_5(OH)_3$	ж	397,0	47,5	18	—	—
Глюкозан (*l*)	$C_6H_{10}O_5$		678,0	—	—	—	—
Диметиламин	$(CH_3)_2NH$	ж	416,7	—	—	—	—
Динитробензол М	$C_6H_4(NO_2)_2$	т	696,8	24,7	89,8	—	—
Дифениламин	$(C_6H_5)_2NH$	»	1536,2	25,2	52,9	—	—
Диэтиламин	$(C_2H_5)_2NH$	ж	716,9	—	—	91,0	58
Иодоформ	CHJ_3	т	161,9	—	—	—	—
Камфора	$C_{10}H_{16}O$	»	1411,0	10,7	178,4	—	—
Крезол М	$CH_3C_6H_4OH$	ж	880,5	—	—	—	—
О	$CH_3C_6H_4OH$	т	879,5	—	—	—	—
П	$CH_3C_6H_4OH$	»	880,0	26,3	35	—	—
Ксилол М	$C_6H_4(CH_3)_2$	ж	1088,4	25,8	—53,5	81,8	138,5
О	$C_6H_4(CH_3)_2$	»	1091,7	29,3	—27	82,9	141,4
П	$C_6H_4(CH_3)_2$	»	1089,1	38,1	13,2	81,0	137,1
Лимонная кислота	$H_3C_6H_5O_7$	т	474,5	—	—	—	—
Метан	CH_4	г	210,8	14,0	—184	138	—159
Мочевина	$CO(NH_2)_2$	т	128,6	—	—	—	—
Муравьиная кислота	$HCOOH$	ж	62,8	58,9	8,6	120,0	101
Нафталин	$C_{10}H_8$	т	1232,5	36,0	80,2	75,5	218
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	ж	739,2	22,5	5,7	79,1	210
Нитроглицерин	$C_3H_5(NO_3)_3$	»	432,4	—	—	—	—
Октан (норм.)	C_8H_{18}	»	1302,7	43,2	—56,5	70,9	125
Олеиновая кислота	$C_{17}H_{33}COOH$	»	2657,0	—	—	—	—
Пальмитиновая кислота	$C_{15}H_{31}COOH$	»	2398,4	39,2	63	—	—
Пентан (норм.)	C_5H_{12}	»	833,4	27,7	—131,5	—	—
Пикриновая кислота	$HOC_6H_2(NO_2)_3$	т	611,8	—	—	—	—
Пиридин	C_5H_5N	ж	658,5	—	—	107,4	114,1
Пирогаллол	$C_6H_3(OH)_3$	т	638,7	—	—	—	—
Пирокатехин	$C_6H_4(OH)_2$	»	684,8	—	—	—	—
Пропан	C_3H_8	г	526,3	—	—	98	—30
						83,4	20
Пропиловый спирт	$C_3H_5CH_2OH$	ж	480,5	—	—	97,2	164
Пропионовая кислота	C_2H_5COOH	»	367,2	—	—	98,8	139,3
Салициловая кислота	HOC_6H_4COOH	т	723,1	—	—	—	—
Стеариновая кислота	$C_{17}H_{35}COOH$	»	2711,8	47,6	69	—	—
Тетрил	$C_7H_5N_5O_8$	»	842,3	—	—	—	—
Толуол	$C_6H_5CH_3$	ж	934,2	—	—	86,5	109,6
Тринитротолуол	$CH_3C_6H_2(NO_2)_3$	т	820,7	22,3	81	—	—
Уксусная кислота	CH_3COOH	ж	209,4	43,2	16,7	96,8	118,3
Уксусноамиловый эфир	$C_5H_{11}COOCH_3$	»	1042,5	—	—	—	—
Уксусноэтиловый эфир	$C_2H_5COOCH_3$	»	536,9	—	—	102,0	0
Уксусный ангидрид	$(CH_3CO)_2O$	»	431,9	—	—	66,2	137
Фенол	C_6H_5OH	т	732,2	29,0	42	—	—
Формальдегид	CH_2O	г	134,1	—	—	—	—
Фталевая кислота	$C_6H_4(COOH)_2$	т	771,0	—	—	—	—
Фурфурол	C_4H_3OCHO	ж	559,5	—	—	160,6	107,5
Хинолин	C_9H_7N	»	1123,5	—	—	—	—
Хлороформ	$CHCl_3$	»	89,2	—	—	59,0	61,5
Цетиловый спирт	$C_{16}H_{33}OH$	т	2504,5	33,8	49	—	—
Циклогексан	$(CH_2)_6$	ж	937,8	7,4	6,5	85,6	80,0
Щавелевая кислота	$(COOH)_2$	т	60,2	—	—	—	—
Этан	CH_3CH_3	г	368,4	22,2	—172	258	—90
						75	0
Этилен	C_2H_4	»	331,6	25,0	—169,5	—	—
Этилена окись	C_2H_4O	ж	302,1	—	—	—	—
Этилендиамин	$H_2NCH_2CH_2NH_2$	»	452,6	—	—	—	—
Этиловый спирт	C_2H_5OH	»	327,6	24,9	—112	204	78,3
Янтарная кислота	$(CH_2COOH)_2$	т	357,1	—	—	—	—

ТЕПЛОТЫ И СВОБОДНЫЕ ЭНЕРГИИ ОБРАЗОВАНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

[3], [16], [34], [35]

Теплота образования ΔH равна увеличению энтальпии, сопровождающему реакцию образования данного соединения из простых веществ (элементов в свободном виде); если численное значение ΔH отрицательно, то теплота в процессе образования выделяется, в противном случае она, наоборот, поглощается.

Свободной энергией названа величина $\Delta\Phi$, представляющая собой возрастание термодинамического потенциала $U - TS + pv$.

Величины ΔH и $\Delta\Phi$ выражены в табл. 15 в *ккал/моль*; при этом значения ΔH отнесены к температуре 18° при условии постоянства давления, значения $\Delta\Phi$ — к 25° при стандартном состоянии ($p = 1$ *am*) как самого соединения, так и простых веществ, из которых оно образовано. Принятые в табл. 15 сокращения: твердое состояние — т, жидкое — ж, газообразное — г.

Таблица 15

Теплота и свободные энергии образования соединений

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	ΔH	$\Delta\Phi$
Азот	N_2	г	0,00	0,00
двуокись	NO_2	»	7,96	12,27
закись	N_2O	»	19,65	24,93
окись	NO	»	21,53	20,66
пятиокись	N_2O_5	т	0,6	—
трехокись	N_2O_3	ж	20,0	—
четырехокись	N_2O_4	»	12,2	—
			−41,66	—
Азотная кислота	HNO_3	»	−34,4	—
Алюминий	Al	т	0,00	0,00
бромистый	$AlBr_3$	»	−126,7	—
гидроокись	$Al(OH)_3$	»	−304,9	−272,9
иодистый	AlJ_3	»	−77,2	—
карбид	Al_4C_3	»	−245	—
нитрид	AlN	»	−80	—
окись	Al_2O_3	»	−380	—
сернистый	Al_2S_3	»	−140,5	—
сернокислый	$Al_2(SO_4)_3$	»	−770	—
фтористый	AlF_3	»	−329	—
хлористый	$AlCl_3$	»	−166,8	—
Аммиак	NH_3	г	−11,00	3,94
Аммоний азотистокислый	NH_4NO_2	т	−61,5	—
азотнокислый	NH_4NO_3	»	−87,13	—
бромистый	NH_4Br	»	−64,58	—
персульфат	$(NH_4)_2S_2O_8$	»	−395,4	—
роданистый	NH_4CNS	»	−17,8	—
сернокислый	$(NH_4)_2SO_4$	»	−281,46	—
фтористый	NH_4F	»	−111,6	—
хлористый	NH_4Cl	»	−74,95	−47,81
Барий	Ba	»	0,00	0,00
азотнокислый	$Ba(NO_3)_2$	»	−236,9	—
гидроокись	$Ba(OH)_2$	»	−225,9	—
окись	BaO	»	−133	—
перекись	BaO_2	»	−152,4	−138,0
сернистый	BaS	»	−111,2	—
сернокислый	$BaSO_4$	»	−349,4	—
углекислый	$BaCO_3$	»	−290,9	−271,4
хлористый	$BaCl_2$	»	−205,28	—
Бериллий	Be	»	0,00	0,00
окись	BeO	»	−135	—
хлористый	$BeCl_2$	»	−112,6	—

Продолжение табл. 15

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	ΔH	$\Delta \Phi$
Ванадий	V	т	0,00	0,00
окись	V_2O_2	»	−195	—
трехокись	V_2O_3	»	−330	−311
четырехокись	V_2O_4	»	−383	—
пятиокись	V_2O_5	»	−487	−406
хлористый	VCl_2	»	−147	—
Висмут	Bi	»	0,00	0,00
гидроокись	$Bi(OH)_3$	»	−171,1	—
окись	BiO	»	−49,5	−43,2
трехокись	Bi_2O_3	»	−137,1	−116,6
сернистый	Bi_2S_3	»	−26,0	—
хлористый	$BiCl_3$	»	−90,6	−76,4
Вода	H_2O	ж	−68,372	−56,693
		г	−57,798	−54,635
Вода тяжелая	D_2O	ж	—	−58,2
		г	—	−56,06
Водород	H_2	»	0,00	0,00
бромистый	HBr	»	−8,65	—
иодистый	HJ	ж	5,91	—
перекись	H_2O_2	»	−45,20	−28,23
		г	−33,59	−24,73
сернистый	H_2S	»	−4,8	−7,87
фтористый	HF	»	−64,0	—
фосфористый	H_3P	»	−2,3	1,08
хлористый	HCl	»	−22,05	−27,78
цианистый	HCN	»	31,1	27,94
Вольфрам	W	т	0,00	0,00
двуокись	WO_2	»	−130,5	−118,3
трехокись	WO_3	»	−195,7	−171,4
Галлий	Ga	»	0,00	0,00
окись	Ga_2O_3	»	−256	−235
Германий	Ge	»	0,00	0,00
двуокись	GeO_2	»	—	−142,0
Гидроксиламин	NH_2OH	ж	−25,5	—
Железо	Fe	т	0,00	0,00
гидрат закиси	$Fe(OH)_2$	»	−135,9	−115,7
гидрат окиси	$Fe(OH)_3$	»	−197,3	−166,3
закись	FeO	»	−64,3	—
закись-окись	Fe_3O_4	»	−266,9	—
карбонил	$Fe(CO)_5$	ж	−187,6	—
окись	Fe_2O_3	т	−198,5	—
сернистое	FeS	»	−23,1	−22,9
силикат	$FeSiO_3$	»	−273,5	—
углеродистое	Fe_3C	»	−5,2	—
хлористое	$FeCl_2$	»	−81,9	—
хлорное	$FeCl_3$	»	−96,4	—
Золото	Au	»	0,00	0,00
гидроокись	$Au(OH)_3$	»	−100,6	—
трехокись	Au_2O_3	»	11,0	18,71
хлористое	AuCl	»	−8,3	—
хлорное	$AuCl_3$	»	−23,8	—

Продолжение табл. 15

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	ΔH	$\Delta\Phi$
Индий	In	т	0,00	0,00
окись	In_2O_3	»	−240	−218
хлористый	$InCl_3$	»	−128,5	—
Иод	J_2	»	0,00	0,00
пятиокись	J_2O_5	»	−42,5	—
Иридий	Ir	»	0,00	0,00
двуокись	IrO_2	»	−40	−28
двухлористый	$IrCl_2$	»	−40,6	−32,0
треххлористый	$IrCl_3$	»	−60,5	−46,5
хлористый	IrCl	»	−20,5	−16,9
Кадмий	Cd	»	0,00	0,00
гидроокись	$Cd(OH)_2$	»	−133,6	−112,7
окись	CdO	»	−65,2	—
сернистый	CdS	»	−34,6	−33,1
сернокислый	$CdSO_4$	»	−222,22	—
хлористый	$CdCl_2$	»	−93,0	—
Калий	K	»	0,00	0,00
азотнокислый	KNO_3	»	−118,09	—
бромистый	KBr	»	−94,07	−90,45
гидрат окиси	KOH	»	−102,02	—
иодистый	KJ	»	−78,87	—
иодноватокислый	KJO_3	»	−121,70	—
марганцовокислый	$KMnO_4$	»	−192,9	—
окись	K_2O	»	−86,2	—
перекись	K_2O_2	»	−135	—
роданистый	KCNS	»	−47,0	—
сернистый	K_2S	»	−121,5	—
сернокислый	K_2SO_4	»	−342,66	—
углекислый	K_2CO_3	»	−274,03	—
фтористый	KF	»	−134,51	—
хлористый	KCl	»	−104,36	−97,56
хлорноватокислый	$KClO_3$	»	−91,33	—
хромовокислый	K_2CrO_4	»	−333,4	—
цианистый	KCN	»	−28,1	—
Кальций	Ca	»	0,00	0,00
гидрат окиси	$Ca(OH)_2$	»	−236,0	−214,8
карбид	CaC_2	»	−14,5	—
окись	CaO	»	−151,7	—
перекись	CaO_2	»	−156,4	−142,0
сернистый	CaS	»	−113,4	—
сернокислый	$CaSO_4$	»	−340,7	—
углекислый	$CaCO_3$	»	−289,1	−207,22
фосфорнокислый	$Ca_3(PO_4)_2$	»	−983	—
фтористый	CaF_2	»	−290,2	—
хлористый	$CaCl_2$	»	−190,6	—
Кислород	O_2	г	0,00	0,00
озон	O_3	»	34,5	39,4
Кобальт	Co	т	0,00	0,00
гидрат закиси	$Co(OH)_2$	»	−131,5	−108,9
» окиси	$Co(OH)_3$	»	−177,0	−142,0
закись	CoO	»	−57,5	—
закись-окись	Co_3O_4	»	−196,5	—
сернистый	CoS	»	−22,3	−19,8
Кремний	Si	»	0,00	0,00
водородистый	SiH_4	г	−8,7	−3,3
карбид (карборунд)	SiC	т	−28	−27,2
двуокись (кварц)	SiO_2	»	−203,34	−190,4
фтористый	SiF_4	г	−360,1	−351,0
хлористый	$SiCl_4$	»	−142,5	—
		ж	−150,1	−134,1
Кремниевая кислота (мета)	H_2SiO_3	г	−267,8	−247,9
Лантан	La	т	0,00	0,00
хлористый	$LaCl_3$	»	−253,1	—
Литий	Li	»	0,00	0,00
гидроокись	LiOH	»	−116,55	—
окись	Li_2O	»	−142,3	—
хлористый	LiCl	»	−97,65	—

Продолжение табл. 15

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	ΔH	$\Delta \Phi$
Магний	Mg	т	0,00	0,00
гидрат окиси (брусит)	$Mg(OH)_2$	»	−223,9	−193,3
нитрид	Mg_3N_2	»	−116	—
кремнекислый	$MgSiO_3$	»	−347,5	—
окись	MgO	»	−146,1	−136,37
углекислый	$MgCO_3$	»	−267,6	−246,42
хлористый	$MgCl_2$	»	−151,6	—
Марганец	Mn	»	0,00	0,00
гидрат закиси	$Mn(OH)_2$	»	−163,4	−143,1
двуокись	MnO_2	»	−123	−102,9
закись	MnO	»	−96,5	−91,22
закись-двуокись	Mn_3O_4	»	−345	—
карбид	Mn-C	»	−23	—
кремнекислый	$MnSiO_3$	»	−301,3	−282,1
окись	Mn_2O_3	»	−233	—
сернистый	MnS	»	−47,0	−46,0
Медь	Cu	»	0,00	0,00
гидрат окиси	$Cu(OH)_2$	»	−106,8	−85,5
закись	Cu_2O	»	−42,5	−35,15
окись	CuO	»	−38,5	−30,4
сернистая (закись)	Cu_2S	»	−18,97	−20,2
сернистая (окись)	CuS	»	−11,6	−11,76
Молибден	Mo	»	0,00	0,00
двуокись	MoO_2	»	−130	−118,0
окись	MoO_3	»	−176,5	−157,6
сернистый	MoS_2	»	—	53,96
Мышьяк	As	»	0,00	0,00
пятиокись	As_2O_5	»	−217,9	—
сернистый	As_2S_3	»	−20	−20
трехокись	As_2O_3	»	−154,1	−137,7
Натрий	Na	»	0,00	0,00
азотистокислый	$NaNO_2$	»	−86,6	—
азотнокислый	$NaNO_3$	»	−111,72	—
гидрат окиси	NaOH	»	−101,96	−90,48
кремнекислый	Na_2SiO_3	»	−371,2	—
окись	Na_2O	»	−99,45	—
перекись	Na_2O_2	»	−119,2	−105,0
серноватистокислый	$Na_2S_2O_3$	»	−258,5	—
сернокислый	Na_2SO_4	»	−330,48	—
тетраборнокислый (бура)	$Na_2B_4O_7$	»	−742,6	—
углекислый	Na_2CO_3	»	−269,46	−250,59
фосфорнокислый (двузамещенный)	Na_2HPO_4	»	−414,85	—
хлористый	NaCl	»	−98,33	−91,70
Ниобий (колумбий)	Nb (Cb)	»	0,00	0,00
пятиокись	Nb_2O_5	»	−442	−425,8
Никель	Ni	»	0,00	0,00
гидрат закиси	$Ni(OH)_2$	»	−129,8	−105,6
гидрат окиси	$Ni(OH)_3$	»	−163,2	—
закись	NiO	»	−58,4	−53,03
карбид	NiC_2	»	9,2	—
сернистый	NiS	»	−20,4	—
хлористый	$NiCl_2$	»	−75,0	—
Олово	Sn	»	0,00	0,00
гидрат закиси	$Sn(OH)_2$	»	−136,2	−115,95
закись	SnO	»	−67,7	—
окись	SnO_2	»	−138,1	—
сернистое	SnS	»	−22,7	−21,25
хлористое	$SnCl_2$	»	−81,1	—
хлорное	$SnCl_4$	ж	−127,4	−110,60
Ртуть	Hg	»	0,00	0,00
закись	Hg_2O	т	−21,5	−12,80
окись	HgO	т (красная)	−21,7	−13,94
сернистая	HgS	т (черная)	−10,7	−8,80
хлористая (каломель)	Hg_2Cl_2	т	−63,15	−50,3
хлорная (сулема)	$HgCl_2$	»	−53,4	−42,2

Продолжение табл. 15

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	ΔH	$\Delta\Phi$
Свинец	Pb	т	0,00	0,00
азотнокислый	$Pb(NO_3)_2$	»	−106,89	—
гидроокись	$Pb(OH)_2$	»	−123,0	−102,2
двуокись	PbO_2	»	−65,0	−52,0
окись	PbO	т (желтая)	−52,06	−44,96
окись-двуокись (сурик)	Pb_3O_4	т	−172,4	−142,2
сернистый	PbS	»	−22,3	−21,9
сернокислый	$PbSO_4$	»	−218,5	−159,5
Сера	S	т (ромбическая)	0,00	0,00
		т (моноклинная)	−0,075	0,018
двуокись	SO_2	ж	−77,0	—
		г	−70,92	−71,74
трехокись	SO_3	т	−105,2	—
»		ж	−104,2	—
»		г	93,9	—
шестифтористая	SF_6	»	−262	−235,0
хлористая	S_2Cl_2	ж	−14,3	−5,90
Серная кислота	H_2SO_4	»	−193,75	—
Серебро	Ag	т	0,00	0,55
азотнокислое	$AgNO_3$	»	−29,4	4,96
бромистое	AgBr	»	−23,81	−22,90
окись	Ag_2O	»	−6,95	−2,59
сернистое	Ag_2S	»	−5,5	−9,50
хлористое	AgCl	»	−30,30	−26,22
Стронций	Sr	»	0,00	0,00
гидрат окиси	$Sr(OH)_2$	»	−228,7	—
окись	SrO	»	−140,8	—
хлористый	$SrCl_2$	»	−197,87	—
Сурьма	Sb	»	0,00	0,00
окись	Sb_2O_3	»	−165,4	−149,0
пятиокись	Sb_2O_5	»	−230,0	−195,5
сернистая	Sb_2S_3	»	−35,7	−35,7
фтористая	SbF_3	»	−216,6	—
хлористая	$SbCl_3$	»	−91,4	−77,8
Таллий	Tl	»	0,00	0,00
закись	Tl_2O	»	−42,3	—
окись	Tl_2O_3	»	−120	—
Тантал	Ta	»	0,00	0,00
окись	Ta_2O_5	»	−499	−447,2
Титан	Tl	»	0,00	0,00
двуокись (рутил)	TiO_2	»	−218,0	−205,3
карбид	TiC	»	−110	—
трехокись	Ti_2O_3	»	—	−340,8
четыреххлористый	$TiCl_4$	ж	−181,4	—
Торий	Th	т	0,00	0,00
гидроокись	$Th(OH)_4$	»	−336,1	—
двуокись	ThO_2	»	−293	−280,1
Углерод (графит)	C	»	0,00	0,00
алмаз	C	»	0,45	0,69
двуокись	CO_2	г	−94,052	−94,260
двусернистый (сероуглерод)	CS_2	ж	15,4	17,15
окись	CO	г	−26,416	−32,808
четыреххлористый	CCl_4	ж	−33,8	−15,60
Амиловый спирт (норм.)	$C_5H_{12}O$	»	−86,06	−39,10
Анилин	C_6H_7N	»	7,34	35,40
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	т	27,60	64,80
Ацетилен	C_2H_2	г	54,8	50,0
Ацетон	C_3H_6O	ж	—	−37,22
Бензойная кислота	$C_7H_6O_2$	т	−93,21	−60,10
Бензол	C_6H_6	ж	11,63	29,40
Гексан (норм.)	C_6H_{14}	»	−53,41	−7,00
Глицерин	$C_3H_8O_3$	»	−159,16	−113,60
Ксилол М	C_8H_{10}	»	−4,67	27,00
О	C_8H_{10}	»	−4,67	27,30
П	C_8H_{10}	»	−8,47	23,20

Продолжение табл. 15

Название соединения	Химическая формула	Агрегатное состояние	ΔH	$\Delta\Phi$
Метан	CH_4	г	−17,889	−12,140
Мочевина	CH_4ON_2	т	—	−47,12
Муравьиная кислота	CH_2O_2	ж	−96,6	−84,94
Нафталин	$C_{10}H_8$	т	15,96	45,20
Нитробензол	$C_6H_5O_2N$	ж	—	36,40
Октан (норм.)	C_8H_{18}	»	−64,21	−3,00
Пальмитиновая кислота	$C_{16}H_{32}O_2$	т	−215,80	−80,00
Пикриновая кислота	$C_6H_3O_7N_3$	»	—	10,00
Пропиловый спирт (норм.)	C_3H_8O	ж	−72,86	−40,90
Тиофен	C_4H_4S	»	—	26,30
Толуол	C_7H_8	»	2,18	26,8
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	»	−116,8	−94,1
Уксусноамиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	»	—	−77,90
Уксусноэтиловый эфир	$C_4H_8O_2$	»	—	−77,60
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	»	—	−104,20
Уран	U	т	0,00	0,00
двуокись (закись)	UO_2	»	−256,6	−242,2
закись-окись	U_3O_8	»	−845,2	—
карбид	UC_2	»	−29	—
трехокись	UO_3	»	−291,6	—
четыреххлористый	UCl_4	»	−251	—
Фенол	C_6H_6O	»	−38,37	−11,00
Фосфор	P	т (белый)	0,00	0,00
		т (красный)	−4,22	−1,80
пятиокись	P_2O_5	т	−360,0	—
пятихлористый	PCl_5	»	−106,5	—
треххлористый	PCl_3	ж	−76,9	−63,3
Фосфорная кислота (орто)	H_3PO_4	т	−303,37	—
Хром	Cr	»	0,00	0,00
карбид	CrC_2	»	−140	—
окись	Cr_2O_3	»	−273	—
Хромовый ангидрид	CrO_3	»	−139,3	—
Цезий	Cs	»	0,00	0,00
гидроокись	CsOH	»	−100,2	—
окись	Cs_2O	»	− 82,1	—
Церий	Ce	»	0,00	0,00
двуокись	CeO_2	»	−233,4	—
Циклогексан	C_6H_{12}	ж	−36,70	6,80
Цинк	Zn	»	0,00	0,00
гидрат окиси	$Zn(OH)_2$	»	−155,8	−132,6
окись	ZnO	»	−83,5	—
сернистый	ZnS	»	−44	−43,2
хлористый	$ZnCl_2$	»	−99,55	—
Цирконий	Zr	»	0,00	0,00
гидроокись	$Zr(OH)_4$	»	−411,0	—
двуокись	ZrO_2	»	−258,1	−245,4
карбид	ZrC	»	−44	—
хлористый	$ZrCl_4$	»	−268,9	—
Щавелевая кислота	$C_2H_2O_4$	т	−196,7	−165,90
Этан	C_2H_6	г	−20,236	−7,860
Этилен	C_2H_4	»	11,86	16,28
Этиловый спирт	C_2H_6O	ж	−66,28	−40,20
Янтарная кислота	$C_4H_6O_4$	т	−224,99	−178,80

Таблица 16

Константы равновесия в газовой фазе

Химическое уравнение	Константа равновесия K	Температурная зависимость
$H_2 \rightleftarrows 2H$	$K = \frac{P_H^2}{P_{H_2}}$	$\lg K = -\frac{19\,700}{T} + 4{,}89$
$Cl_2 \rightleftarrows 2Cl$	$K = \frac{P_{Cl}^2}{P_{Cl_2}}$	$\lg K = -\frac{12\,600}{T} + 0{,}535 \lg T + 4{,}090$
$Br_2 \rightleftarrows 2Br$	$K = \frac{P_{Br}^2}{P_{Br_2}}$	$\lg K = -\frac{10\,100}{T} + 1{,}75 \lg T - 4{,}09 \cdot 10^{-4} T + 4{,}72610^{-8} T^2 - 0{,}054$
$J_2 \rightleftarrows 2J$	$K = \frac{P_J^2}{P_{J_2}}$	$\lg K = -\frac{7550}{T} + 1{,}75 \lg T - 4{,}09 \cdot 10^{-4} T + 4{,}72610^{-8} T^2 - 0{,}440$
$2HCl \rightleftarrows H_2 + Cl_2$	$K = \frac{P_{H_2} P_{Cl_2}}{P_{HCl}^2}$	$\lg K = -\frac{9586}{T} + 0{,}440 \lg T - 2{,}16$
$2HBr \rightleftarrows H_2 + Br_2$	$K = \frac{P_{H_2} \cdot P_{Br_2}}{P_{HBr}^2}$	$\lg K = -\frac{5223}{T} + 0{,}553 \lg T - 2{,}72$
$2HJ \rightleftarrows H_2 + J_2$	$K = \frac{P_{H_2} P_{J_2}}{P_{HJ}^2}$	$\lg K = -\frac{540{,}4}{T} + 0{,}503 \lg T - 2{,}35$
$2H_2O \rightleftarrows 2H_2 + O_2$	$K = \frac{[H_2]^2 [O_2]}{[H_2O]^2}$	$\lg K = -\frac{24\,900}{T} + 1{,}335 \lg T - 9{,}65 \cdot 10^{-5} T + 1{,}37 \cdot 10^{-7} T^2 - 6{,}65 \cdot 10^{-11} T^3 + 1{,}907 \cdot 10^{-18} T^5 - 1{,}08$
$2H_2S \rightleftarrows 2H_2 + S_2$	$K = \frac{P_{H_2}^2 P_{S_2}}{P_{H_2S}^2}$	$K = 0{,}810^{-4} (t = 750°)$, $3{,}8 \cdot 10^{-4} (t = 830°)$, $24{,}5 \cdot 10^{-4} (t = 945°)$, $118 \cdot 10^{-4} (t = 1065°)$, $260 \cdot 10^{-4} (t = 1132°)$
$2NH_3 \rightleftarrows 3H_2 + N_2$	$K = \frac{P_{NH_3}}{P_{N_2}^{1/2} P_{H_2}^{3/2}}$	$\lg K = \frac{2098{,}2}{T} - 2{,}509 \lg T - 1{,}006 \cdot 10^{-4} T + 1{,}859 \cdot 10^{-7} T^2 + 2{,}10$
$H_2 + CO_2 \rightleftarrows CO + H_2O$	$K = \frac{[H_2O][CO]}{[H_2][CO_2]}$	$\lg K = -\frac{2170}{T} + 0{,}979 \lg T - 1{,}082 \cdot 10^{-3} T + 1{,}734 \cdot 10^{-7} T^2$
$CH_4 + CO_2 \rightleftarrows 2CO + 2H_2$	$K = \frac{P_{CO}^2 P_{H_2}^2}{P_{CH_4} P_{CO_2}}$	$\lg K = -\frac{55\,366}{4{,}573\,T} + 7{,}778 \lg T - 0{,}00232\,T + 0{,}20810^{-6} T^2 + 7{,}878$
$CH_4 + 2H_2O \rightleftarrows CO_2 + 4H_2$	$K = \frac{P_{CH_4} P_{H_2O}^2}{P_{CO_2} P_{H_2}^4}$	$\lg K = 5{,}478\ (T = 575)$, $4{,}166\ (T = 625)$, $2{,}534\ (T = 700)$

Продолжение табл. 16

Химическое уравнение	Константа равновесия K	Температурная зависимость
$CH_4+H_2O \rightleftarrows CO+3H_2$	$K=\frac{P_{CH_4}P_{H_2O}}{P_{CO}P_{H_2}^3}$	$\lg K=3{,}74\ (T=673),\quad 2{,}56\ (T=723),\quad 1{,}72\ (T=763)$
$2CO_2 \rightleftarrows 2CO+O_2$	$K=\frac{[CO]^2[O_2]}{[CO_2]^2}$	$\lg K=-\frac{29\,500}{T}+1{,}75\lg T-1{,}215\cdot10^{-3}T+1{,}35\cdot10^{-7}T^2+3{,}29$
$CO+Cl_2 \rightleftarrows COCl_2$	$K=\frac{P_{CO}^2P_{Cl_2}}{P_{COCl_2}}$	$\lg K=-\frac{5710}{T}+5{,}46$
$N_2O_4 \rightleftarrows 2NO_2$	$K=\frac{P_{NO_2}^2}{P_{N_2O_4}}$	$\lg K=-\frac{2692}{T}+1{,}75\lg T+4{,}83\cdot10^{-3}T-7{,}144\cdot10^{-6}T^2+3{,}062$
$2NO_2 \rightleftarrows 2NO+O_2$	$K=\frac{P_{NO}^2P_{O_2}}{P_{NO_2}^2}$	$\lg K=-\frac{5749}{T}+1{,}70\lg T-5\cdot10^{-4}T+2{,}839$
$N_2O_3 \rightleftarrows NO_2+NO$	$K=\frac{P_{NO_2}P_{NO}}{P_{N_2O_3}}$	$\lg K=2{,}105-45{,}63\,C_{N_2O_3}$ $(t=25°)$, если $C_{N_2O_3}=\frac{P_{NO_2}+P_{NO}+2P_{N_2O_3}}{2RT}$
$2NO \rightleftarrows N_2+O_2$	$K=\frac{[NO]^2}{[N_2][O_2]}$	$\lg\sqrt{K}=\lg 0{,}0249-2{,}148\,\frac{220-T}{T}$
$4CO+2SO_2 \rightleftarrows S_2+4CO_2$	$K=\frac{P_{CO_2}^4P_{S_2}}{P_{CO}^4P_{SO_2}^2}$	$\lg K=-\frac{23\,000}{T}+4{,}34\lg T-1{,}6210^{-7}T+2{,}310^{-7}T^2-2{,}43$
$SO_2 \rightleftarrows O_2+{}^1/_2S_2$	$K=\frac{P_{O_2}\sqrt{P_{S_2}}}{P_{SO_2}}$	$\lg K=43{,}48\ (T=400°),\quad -11{,}91\ (T=1210°),\quad -5{,}60\ (T=2000°)$
$2SO_2+O_2 \rightleftarrows 2SO_3$	$K=\frac{[SO_3]^2[O_2]}{[SO_2]^2}$	$\lg K=-\frac{10\,373}{T}-2{,}222\lg T+14{\cdot}585$
$H_2S \rightleftarrows H_2+{}^1/_2S_2$	$K=\frac{P_{H_2}\sqrt{P_{S_2}}}{P_{H_2S}}$	$\lg K\ 8{,}82\ (T=400°),\quad -1{,}362\ (T=1200°),\quad +0{,}415\ (T=2000°)$
$4H_2S+2SO_2 \rightleftarrows 3S_2+4H_2O$	$K=\frac{[H_2O]^4[S_2]^3}{[H_2S]^4[SO]^2}$	$\lg K=0{,}5\ (T=773°),\quad 2{,}6\ (T=1073°)\quad 3{,}1\ (T=1273°)$
$H_2O+SO_3 \rightleftarrows H_2SO_4$	$K=\frac{[H_2O][SO_3]}{[H_2SO_4]}$	$\lg K=-\frac{5000}{T}+0{,}75\lg T-5{,}7\cdot10^{-4}T+4{,}086$
$C_2H_6 \rightleftarrows C_2H_4+H_2$	$K=\frac{[C_2H_4][H_2]}{[C_2H_6]}\cdot\frac{P}{100}$	$\lg K=-\frac{31\,244}{4{\cdot}573T}+6{,}315$

Таблица 17

Максимальные температуры пламени при горении различных газов в смесях с воздухом и кислородом

Газ	С воздухом		С кислородом	
	Газа в смеси в %	Температура пламени в °С	Газа в смеси в %	Температура пламени в °С
Аммиак (NH_3)	21	1700	—	—
Ацетилен (H_2C_2)	9,0	2325	33	3005
Бутилен (C_4H_8)	3,4	1930	—	—
Водород (H_2)	31,6	2045	73	2525
			78	2660
			82	2425
			65	2730
Городской газ	—	—		
Каменноугольный газ	17,6	1918	—	—
Метан (CH_4)	10	1875	—	—
Окись углерода (CO)	20	1650	60	2905
	25	1930	70	2925
	32	2100	80	2805
	45	1850	—	—
Природный газ	—	—	45	2930
Пропан (C_3H_8)	4,16	1925	—	—
Пропилен (C_3H_6)	4,5	1935	—	—
Этан (C_2H_6)	5,8	1895	—	—
Этилен (C_2H_4)	7,0	1975	—	—

Таблица 18

Воспламеняемость горючих веществ и средства тушения

(1 — вода, 2 — пенообразующие вещества, 3 — углекислота, 4 — сухой огнетушитель)

Наименование вещества	Температура вспышки в °С		Пределы воспламенения (в % в воздухе)		Температура самовоспламенения в °С		Средства тушения
	Закрытый сосуд	Открытый сосуд	нижний	верхний	в воздухе	в кислороде	
Аммиак	—	—	15,5	27	780	—	3; 4
Водород	—	—	4,1	74,2	510	450	—
Окись углерода	—	—	12,5	75	610	590	1; 3; 4
Сера	207	227	—	—	232	—	1
Сероводород	—	—	4,3	45,5	290	220	—
Сероокись углерода	—	—	11,9	28,5	—	—	1; 3; 4
Сероуглерод	—30	—	1,0	50	105	—	1; 3; 4
Фосфор красный	—	—	—	—	260	—	1
Фосфор желтый	—	—	—	—	30	—	1
Хлор с водородом	—	—	—	—	240	—	—
Циан	—	—	6,6	42,6	850	800	—
Цианистый водород	—	—	5,6	40	538	—	—
Антрацен	120	196	—	—	—	—	1; 2; 3; 4
Ацетилен	—	—	2,3	82	335	300	—
Бензол	—11	—	1,4	9,5	570	—	2; 3; 4
Бутадиен (1, 2)	—	—	1,37	—	—	—	—
Бутан	—60	—	1,5	8,5	430	—	—
Гексан	—22	—	1,1	6,9	247	—	3; 4
Гептан	4	—	1,0	6	233	—	2; 3; 4
Ксилол (0)	17	24	1,0	—	495	—	2; 3; 4
Метан	—	—	4,9	15,4	537	—	—
Нафталин	79	87,5	0,9	—	565	—	1; 3; 4
Октан	17	—	1,0	—	—	—	2-3-4
Пропан	—	—	2,1	9,5	466	490	—
Толуол	4	7	1,27	7,0	549	—	2; 3; 4
Этан	—	—	3,1	15	510	500	2; 3; 4

Продолжение табл. 18

Наименование вещества	Температура вспышки в °С		Пределы воспламенения (в % в воздухе)		Температура самовоспламенения в °С		Средства тушения
	Закрытый сосуд	Открытый сосуд	нижний	верхний	в воздухе	в кислороде	
Этилен	—	—	3,0	34	540	485	—
Амиловый спирт (изо)	40—42	—	—	—	409	390	3; 4
Ацетальдегид	—27	—	3,97	57,0	156	140	1; 3; 4
Ацетон	—18	9	2,15	13,0	500	—	1; 3; 4
Бутиловый спирт (Н)	28	43,5	1,68	—	441	385	3; 4
Глицерин	100	176,5	—	—	500	414	1; 3; 4
Диметилфталат	146	163	—	—	—	—	1; 2; 3; 4
Диоксан (1,4)	18	—	1,97	22,2	450	—	3; 4
Метиловый спирт	12	16	5,5	36,5	400	—	3; 4
β-нафтол	150	171	—	—	—	—	1; 3; 4
Пропиловый спирт (Н)	15	29	2,5	—	433	—	3; 4
Уксусная кислота (ледяная)	40	43	4,0	—	568	—	1; 3; 4
Уксуснокислый амил	24,5	27	1,1	—	378,5	—	3; 4
Уксуснокислый изоамил	33,5	38	—	—	379	—	3; 4
Уксуснокислый этил	—4	—1	2,18	11,5	486	—	3; 4
Формальдегид	54,5	93	—	—	430	—	3; 4
Фенол	79,5	85	—	—	700	574	1; 3; 4
Этиловый спирт	13	—	3,28	20	426	—	1; 3; 4
Этиловый эфир	—41	—	1,6	48	180	—	3; 4
Анилин	71	—	—	—	700	530	—
Дихлорэтан (1, 2)	13	18	6,2	15,9	413	—	1; 2; 3; 4
Нитробензол	88—90	—	—	—	520	—	—
Пиридин	20	—	1,8	12,4	573	—	3; 4

Таблица 19

Границы воспламенения газов в смесях их с кислородом

Вещество	Границы воспламенения (в % горючего газа)		Вещество	Границы воспламенения (в % горючего газа)	
	нижняя	верхняя		нижняя	верхняя
Аммиак (NH_3)	13,5	79	Пропилен (C_3H_6)	2,1	53
Ацетилен (C_2H_2)	2,8	93	Этан (C_2H_6)	3,9	50,5
Водород (H_2)	4,5	95	Этилен (C_2H_4)	3,0	93
Метан (CH_4)	5	60	Этиловый эфир ($(C_2H_5)_2O$)	2,1	82
Окись углерода (CO)	15,5	94			

Таблица 20

Максимальная скорость распространения пламени в смесях газов с воздухом и кислородом

Вещество	Максимальная скорость воспламенения в *см/сек*		Вещество	Максимальная скорость воспламенения в *см/сек*	
	с воздухом	с кислородом		с воздухом	с кислородом
Ацетилен (C_2H_2)	131	1350			
Водород (H_2)	267	890	Метан (CH_4)	35	330
Водяной газ	160	470	Окись углерода (CO)	33	110
Городской газ	64	705	Пропан (C_3H_8)	32	370

ДИФФУЗИЯ МЕТАЛЛОВ В МЕТАЛЛАХ

Коэффициент диффузии D определяется уравнением:

$$\frac{ds}{dt} = -qD\frac{dc}{dl},$$

где ds — количество вещества, продиффундировавшее в направлении оси x сквозь сечение q за время dt при перепаде концентрации $-\frac{dc}{dx}$.

Таблица 21

Диффузия металлов в металлах

Диффундирующий металл	Диффузионная среда	Температура в °С	D в $см^2/сутки$	Диффундирующий металл	Диффузионная среда	Температура в °С	D в $см^2/сутки$
Ag	Al	462	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	Au	Ni	900	$7{,}5 \cdot 10^{-5}$
Ag	Pb	250	$2{,}6 \cdot 10^{-3}$	Au	Pb	100	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$
Ag	Pb	285	$7{,}9 \cdot 10^{-3}$	Au	Pb	200	$7{,}5 \cdot 10^{-3}$
Ag	Sn	500	4,14	Au	Pb	500	3,2
Al	Cu	500	$15 \cdot 10^{-7}$	Li*	Hg	8,2	0,60
Al	Cu	650	$3 \cdot 10^{-6}$	Mg	Al	420	$6{,}6 \cdot 10^{-6}$
Al	Cu	850	$1{,}9 \cdot 10^{-4}$	Mn	Cu	400	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$
Au	Ag	491	$2{,}2—5{,}7 \cdot 10^{-12}$	Mn	Cu	950	$5{,}6 \cdot 10^{-5}$
Au	Ag	624	$0{,}6—1{,}2 \cdot 10^{-9}$	Mn	Ni	970	$8 \cdot 10^{-6}$
Au	Ag	717	$2{,}5—5{,}4 \cdot 10^{-8}$	Na*	Hg	9,6	0,64
Au	Ag	861	$9{,}4 \cdot 10^{-7}$	Ni	Cu	550	$6{,}1 \cdot 10^{-8}$
Au	Ag	1040	$2{,}8 \cdot 10^{-5}$	Ni	Cu	950	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$
Au	Ag	1120	$5{,}5 \cdot 10^{-4}$	Ni	Pb	252	$3 \cdot 10^{-6}$
Au	Bi	500	4,5	Ni	Mn	970	$4{,}5 \cdot 10^{-6}$
Rb*	Hg	7,3	0,46	Pb*	Hg	15,6	1,37
Sb	Ag	650	$3{,}3 \cdot 10^{-5}$	Pb	Pb	250	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$
Si	Al	462	$3{,}1 \cdot 10^{-5}$	Pb	Sn	500	3,18
Sn	Ag	650	$5{,}4 \cdot 10^{-4}$	Pd	Cu	490	$7{,}8 \cdot 10^{-8}$
Sn	Cu	400	$4{,}1 \cdot 10^{-8}$	Pd	Cu	950	$2{,}2—2{,}5 \cdot 10^{-5}$
Sn	Cu	850	$3{,}4 \cdot 10^{-4}$	Pt	Cu	490	$5{,}0 \cdot 10^{-8}$
Sn*	Ag	10,7	1,53	Pt	Cu	960	$9{,}5—20 \cdot 10^{-6}$
Au	Pd	900	$2{,}9 \cdot 10^{-5}$	Pt	Pb	490	1,69
Au	Pt	900	$7{,}5 \cdot 10^{-6}$	Cu	Al	462	$8{,}5 \cdot 10^{-6}$
Au	Sn	500	4,6	Cu	Au	301	$1{,}3 \cdot 10^{-8}$
Ba*	Hg	78	0,52	Cu	Au	560	$8{,}1 \cdot 10^{-6}$
Bi	Pb	250	$3{,}2 \cdot 10^{-5}$	Cu	Au	616	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$
Ca*	Hg	10,2	0,54	Hg	Cd	156	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$
Cd	Ag	650	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$	Hg	Pb	177	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$
Cd*	Hg	8,7	1,45	Jn	Ag	650	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$
		99,1	2,96	K*	Hg	10,5	0,53
Cd	Hg	20	$1{,}52 \cdot 10^{-5}$	Sn	Rb	250	$4{,}4 \cdot 10^{-6}$
Cd	Pb	167	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	Sn	Pb	245	$2{,}7 \cdot 10^{-6}$
Cd	Pb	252	$7{,}5 \cdot 10^{-5}$	Sn	Pb	285	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$
Cs	Hg	7,3	0,45	Sr*	Hg	9,4	0,47
Cu	Ag	650	$7{,}6 \cdot 10^{-6}$	Te*	Hg	11,5	0,87
Au	Cu	400	$3{,}7—6{,}2 \cdot 10^{-8}$	Te	Pb	250	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$
Au	Cu	510	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$	Te	Te	285	$2 \cdot 10^{-5}$
Au	Cu	650	$2{,}2—10^{-6}$	Zn	Al	462	$5{,}4 \cdot 10^{-5}$
Au	Cu	700	$4{,}2 \cdot 10^{-6}$	Zn	Cu	360	$8{,}3 \cdot 10^{-8}$
Au	Cu	850	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$	Zn	Cu	880	$4{,}8 \cdot 10^{-5}$
Au	Cu	970	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	Zn*	Hg	11,5	2,18
Au	Hg	11	0,72	Zn	Pb	285	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$

* Из 1%-ной амальгамы.

От редакции. Настоящая глава не исчерпывает всех данных из области современной химии, применяемых в машиностроении. Ряд дополнительных данных содержится в главах: 2-го тома (физико-химические и механические свойства чистых металлов, Теория и расчеты процессов горения); 6-го тома (Чугун, Сталь, Цветные металлы и сплавы), 5-го тома (Электрические и химико-механические способы размерной обработки металлов, Технология термической и химико-термической обработки металлов, Технология покрытий деталей машин, Технология производства металлокерамических деталей). Подробные данные по ряду вопросов можно найти в приведенных ниже литературных источниках. Так, например, общие законы химии и свойства химических элементов и их соединений изложены в источнике [29]; основные положения органической химии и общие свойства органических соединений — в [9], [38]; строение атома, свойства элементарных частиц, теория атомных спектров — в [40]; основные положения химической термодинамики, учение о гомогенном равновесии, термическая диссоциация и термодинамическая теория растворов — в [16]; гетерогенное равновесие, правило фаз, физико-химический анализ — в [1]; строение молекул, молекулярные спектры — в [39]; химическая кинетика, гомогенный и гетерогенный процессы — в [4]; учение об электропроводности растворов, электродные потенциалы, гальванические элементы — в [4], [11], [12]; фотохимия — в [4], [18]; сведения по фотографии — в [27], [41]; сведения по цветной фотографии — в [14], [26]; атомная энергия и пути практического ее использования — в [10], [19]; история химических производств в России — в [22]; учение о радиоактивности, изотопии и строении атомного ядра — в [21], [32]; коллоидные системы — в [2], [23]; процессы и аппараты химической технологии — в [17]; минералогия и кристаллография — в [5].

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Аносов В. Я. и Погодин С. А., Основные начала физико-химического анализа, АН СССР, 1947.
2. Александрова-Прейс Е. М., Песков Н. П., Курс коллоидной химии, Госхимиздат, 1949.
3. Брицке Э. В. и Капустинский А. Ф., Термические константы неорганических веществ, АН СССР, 1949.
4. Бродский А. И., Физическая химия, Госхимиздат, 1948.
5. Болдырев А. К., Кристаллография, Химиздат, 1934.
6. Введенский А. А., Термодинамические расчеты процессов топливной промышленности, Гостоптехиздат, 1949.
7. Герцберг Г., Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул, ИИЛ, 1949.
8. Герцберг Г., Спектры и строение двухатомных молекул, ИИЛ, 1949.
9. Губен И., Методы органической химии, Госхимиздат, 1949.
10. Гудмен К., Научные и технические основы ядерной энергетики, ИИЛ, 1948.
11. Глесстон Ф., Электрохимия растворов, Химиздат, 1936.
12. Изгарышев Н. А., Электрохимия и ее техническое применение, Научн. хим.-тех. изд., 1930.
13. Ельяшевич М. А., Волькенштейн В. М., Степанов Б. И., Колебания молекул, Гостехиздат, 1949.
14. Иорданский А. Н., Овечкис Н. С., Мертц К. Л., Чельцов В. С., Цветная фотография на трехслойных материалах, Госкиноиздат, 1950.
15. Капустинский А. Ф., Очерки по истории неорганической и физической химии в России, АН СССР, 1949.
16. Карапетьянц М. Х., Химическая термодинамика, Госхимиздат, 1953.
17. Касаткин А. Г., Основные процессы и аппараты химической технологии, Госхимиздат, 1948.
18. Кен А. и Юнг Г., Фотохимия, Гизлегпром, 1933.
19. Корсунский М. И., Атомное ядро, Гостехтеоретиздат, 1949.
20. Кузнецов И. В., Люди русской науки, Техтеоретиздат, 1948.
21. Кюри М., Радиоактивность, Иноиздат, 1947.
22. Лукьянов П. М., История химических промыслов и химической промышленности России, АН СССР, 1948.
23. Липатов С. М., Физикохимия коллоидов, Госхимиздат, 1948.
24. Менделеев Д. И., Основы химии, т. I и II, Химиздат, 1947.
25. Миз К., Теория фотографического процесса, Иноиздат, 1950.
26. Мертц К. Л., Цветная фотография, Госкиноиздат, 1949.
27. Микулин В. П., Современная фоторецептура, Госкиноиздат, 1949.
28. Микулин В. П., Фотография в 25 уроках, Госкиноиздат, 1949.
29. Некрасов Б. В., Курс общей химии, Химиздат, 1951.
30. Оствальд Лютер Друкер, Физико-химические измерения, Химиздат, 1940.
31. Перельман В. И., Краткий справочник химика, Госхимиздат, 1948.
32. Рицлер, Введение в ядерную физику, ИИЛ, 1948.
33. Словарь органических соединений, Иноиздат, 1949.
34. Справочник физических, химических и технологических величин, Техническая энциклопедия, 1931.
35. Справочник химика т. I, II, III, Госхимиздат, 1951—1952.
36. Спутник химика, Химиздат, 1947.
37. Чмутов К. В., Техника физико-химического исследования, Госхимиздат, 1953.
38. Чичибабин А. Е., Основные начала органической химии, Госхимиздат, 1953.
39. Чубановский К. Л., Молекулярные спектры, Госхимиздат, 1950.
40. Шпольский Э. В., Атомная физика, т. I и II, Техтеоретиздат, 1949.
41. Яштолд-Говорко В. А., Мелкозернистое проявление, Госкиноиздат, 1949.
42. Chemiker-Kalender. Berlin, J. Springer.
43. Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen, J. Springer.
44. Mellor J. W., Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, 1947.
45. Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, 8 Auf., Verlag Chemie.

ГЛАВА XI

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

В табл. 1—4 даны физико-химические свойства и кристаллическая решетка важнейших элементов ([1], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]).

Таблица 1

Физико-химические свойства чистых металлов ([6], [7], [8], [9], [11], [12])

Название металла	Символ	Удельное электросопротивление в *ом·мм²/м*	Температурный коэффициент электросопротивления $\alpha_\vartheta \cdot 10^3$	Электросопротивление в жидком состоянии	
				10^6·*ом/см*	при t° C
Алюминий	Al	0,0269	4,26	20,1	658
Бериллий	Be	0,065	6,67	—	—
Висмут	Bi	1,198	4,46	127	271
Вольфрам	W	0,0601	4,64	—	—
Железо	Fe	0,09065	6,57	—	—
Золото	Au	0,0221	3,98	30,8	1063
Индий	In	0,0845	4,74	29,0	155
Иридий	Ir	0,0658	3,93	—	—
Кадмий	Cd	0,108	4,24	34	400
Калий	K	0,0781	5,81	13	62
Кальций	Ca	0,105	3,33	39	—
Кобальт	Co	0,104	3,66	—	—
Кремний	Si	60 до 1000	—1,2	—	—
Литий	Li	0,093	4,5	45	230
Магний	Mg	0,047	3,9	—	—
Марганец	Mn	0,044	1, 7(α)	—	—
Медь	Cu	0,017	4,33	20,3	1083
Молибден	Mo	0,0478	4,35	—	—
Натрий	Na	0,0465	4,34	9,70	100
Никель	Ni	0,13	5,21	109	1500
Ниобий	Nb	0,187	3,95	—	—
Олово	Sn	0,124	4,47	49	300
Осмий	Os	0,103	4,2	—	—
Палладий	Pd	0,11	3,77	—	—
Платина	Pt	0,109	3,92	—	—
Родий	Rh	0,0512	4,43	—	—
Ртуть	Hg	0,975	0,92	95,8	20
Рубидий	Rb	0,116 (0° C)	4,8	—	—
Рутений	Ru	0,144 (0° C)	—	—	—
Свинец	Pb	0,20	4,22	98	400
Серебро	Ag	0,0159	4,1	17	1000
Стронций	Sr	0,247 (0° C)	3,83	—	—
Сурьма	Sb	0,427	4,73	127	860
Тантал	Ta	0,156	3,47	—	—
Титан	Tl	0,9	4,25	—	—
Хром	Cr	0,026 (0° C)	—	—	—
Цезий	Cs	0,181 (0° C)	4,96	36,6	28
Церий	Ce	0,78 (0° C)	—	—	—
Цинк	Zn	0,0623	4,17	43	440
Цирконий	Zr	0,41	4,4	—	—

Примечания: 1. Переводные коэффициенты электросопротивления ρ: 1 *ом·мм²/м* = $= 10^{-4}$ *ом·см* = 10^2 *мком·см*.

2. Удельная электропроводность $\lambda = \frac{1}{\rho}$.

Таблица 2

Влияние температуры на удельное электросопротивление металлов в *мком·см* [11]

Наименование металла	°C / Символ	−258	−192	−78	0	20	100	200	300	400	500	800	1000	1300	1600
Алюминий	Al	0,1140	0,5749	1,8087	2,670	—	3,7636	4,8599	5,9920	7,1903	—	29,28(ж)	32,22(ж)	—	—
Висмут	Bi	24,56	39,175	78,62	110,0	119,05	159,03	227,87	—	136,0(ж)	—	159,5(ж)	—	—	—
Вольфрам	W	—	0,860	3,588	5,50	—	8,055	10,77	13,64	16,64	17,60	26,79	33,00	43,01	53,01
Железо	Fe	0,1024	0,9092	5,258	9,065	—	15,023	22,414	31,652	42,185	54,762	—	—	—	—
Золото	Au	0,014	0,4904	1,4362	2,065	2,213	2,8873	3,735	4,615	5,534	6,492	—	—	—	—
Иридий	Ir	—	1,375	4,232	6,100	—	8,50	10,946	13,399	16,048	18,727	—	—	—	—
Кадмий	Cd	0,166	1,9659	5,3755	7,758	—	11,044	—	14,630	—	—	34,12(ж)	35,78(ж)	—	—
Калий	K	—	1,856	4,795	7,168	8,00	15,49(ж)	21,80(ж)	28,20(ж)	—	—	—	—	—	—
Кобальт	Co	—	—	1,16	—	9,73	14,26	21,31	30,33	39,25	48,20	—	—	—	—
Кремний	Si	—	297	150	98	—	60	40	120	93	85	23	—	—	—
Литий	Li	0,062	1,149	—	8,55	9,293	12,269	32,09(ж)	—	—	—	—	—	—	—
Магний	Mg	—	1,233	3,053	4,312	—	5,915	7,576	9,536	11,893	—	—	—	—	—
Медь	Cu	0,00908	0,2333	1,0253	1,533	1,672	2,223	2,897	3,5835	4,286	5,008	—	—	22,05(ж)	—
Молибден	Mo	—	1,041	3,016	4,40	—	6,204	8,070	9,99	11,95	13,94	21,93	27,37	36,32	46,2
Натрий	Na	—	0,982	3,23	5,087	—	9,65 (ж)	13,18(ж)	16,17	—	—	—	—	—	—
Никель	Ni	—	3,583	8,043	12,005	—	18,26	26,143	36,523	49,007	54,335	—	—	—	—
Олово	Sn	—	—	—	11,14	12,08	16,37	—	49,45(ж)	51,60(ж)	53,85(ж)	60,45(ж)	64,98(ж)	71,7 (ж)	78,51(ж)
Палладий	Pd	0,09503	2,0131	7,048	10,219	—	14,027	17,598	20,95	24,09	27,0	—	—	—	—
Платина	Pt	0,0618	2,0902	6,7297	9,81	10,51	13,656	17,387	21,005	24,509	27,90	—	—	—	—
Родий	Rh	—	0,761	3,101	4,70	—	6,78	8,945	11,19	13,57	16,05	—	—	—	—
Ртуть	Hg	5,40 (*тв*)	7,38 (*тв*)	18,78 (*тв*)	95,8	97,542	105,27	116,37	130,04	—	—	—	—	—	—
Свинец	Pb	0,5874	5,073	13,311	19,26	20,68	—	27,39	—	—	—	98,00 (ж)	107,2(ж)	121,1(ж)	134,1(ж)
Серебро	Ag	0,00793	0,3040	1,0043	1,468	—	2,0696	2,6854	3,321	3,979	4,651	—	19,22(ж)	22,79(ж)	—
Сурьма	Sb	—	8,812	24,95	38,99	43,045	59,80	81,0	102,5	125,0	144,0	130,76 (ж)	134,98(ж)	—	—
Тантал	Ta	—	4,314	10,66	14,60	—	19,68	24,245	28,6	33,0	37,1	49,3	57,2	66,6	78,5
Таллий	Tl	—	—	11,829	17,633	18,923	—	24,76	—	—	—	—	—	—	—
Титан	Ti	—	630	432	360	—	293	333	—	472	675	—	—	—	—
Цинк	Zn	0,05981	1,2652	3,9463	5,751	—	8,135	10,672	13,461	—	35,45(ж)	35,70(ж)	—	—	—
Цирконий	Zr	—	123	10	20	—	45	78	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 3

Физико-химические свойства чистых металлов ([6], [7], [8], [9])

Название металла	Символ	Поверхностное натяжение в точке плавления в *дин/см*	Вязкость в пуазах при температуре		Удельная магнитная восприимчивость 10^6 на 1 *г* металла	Нормальный потенциал в *в*			Термоэлектродвижущая сила в *мв*
			плавления	1100° С		при валентности ионов	по отношению к электродам		
							водородному	каломелевому	
Алюминий . .	Al	520	—	—	+0,65	Al···	−1,7	—	+0,39
Висмут	Bl	346	0,018	0,0065	−1,35	Bl···	+0,2	−0,1	−7,05
Железо	Fe	581	—	—	—	Fe··	−0,43	−0,71	+0,79
Золото	Au	612	—	—	−0,139	Au·	+1,5	+1,2	—
Кадмий	Cd	815	0,014	—	−0,18	Cd··	−0,4	−0,68	+0,89
Калий	K	411,5	—	—	+0,62	K·	−2,92	−3,2	−0,94
Кальций . . .	Ca	—	—	—	+0,4	Ca··	−2,5	−2,8	—
Кобальт . . .	Co	—	—	—	+1,10	Co··	−0,29	−0,57	−1,7
Магний	Mg	563	—	—	+0,55	Mg··	−1,55	−1,83	+0,41
Марганец . . .	Mn	—	—	—	+9,9	Mn··	−1,0	−1,3	—
Медь	Cu	1178	0,038	0,086	−0,086	Cu··	+0,34	+0,06	+0,74
Медь	Cu	—	—	—	—	Cu·	+0,51	+0,24	—
Натрий	Na	293,6	—	—	+0,51	Na·	−2,71	−2,99	−0,21
Никель	Nl	1350	—	—	—	Nl··	−0,22	−0,5	−1,54
Олово	Sn	531	0,020	0,0075	+0,025	Sn··	−0,1	−0,38	+0,42
Ртуть	Hg	447	0,020	—	−0,19	Hg··	+0,86	+0,58	—
Свинец	Pb	424,5	0,030	0,0105	−0,12	Pb··	−0,12	−0,4	+0,43
Серебро . . .	Ag	858	—	—	−0,20	Ag·	+0,8	−0,52	+0,74
Сурьма	Sb	274	0,015	0,0082	−0,87	Sb···	+0,1	−0,2	+4,7
Хром	Cr	—	—	—	+3,6	Cr··	−0,6	−0,9	—
Хром	Cr	—	—	—	—	Cr···	−0,5	−0,8	—
Цинк	Zn	707,5	—	—	−0,157	Zn··	−0,76	−1,04	+0,76

Таблица 4

Кристаллическая решетка металлов ([1], [8], [10], [12])

Название металла	Символ	Тип решетки	Число атомов в элементарной ячейке	Координационное число	Постоянные решетки в Å			Междуатомное расстояние (ближайшее) в Å	Атомный радиус в Å
					a	b	c или угол между осями		
Алюминий	Al	Кубич. гранецентрированная	4	12	4,0414	—	—	2,8577	1,428
Барий	Ba	Кубич. объемноцентрированная	2	8	5,015	—	—	4,343	2,17
Бериллий α	Be	Гексагональная плотная	2	6,6	2,2680	—	3,5942	2,2236	1,112
Бериллий β	Be	Гексагональная	60	—	7,1	—	10,8	—	—
Бор	B	Орторомбическая	—	—	17,86	8,93	10,13	—	—
Ванадий	V	Кубич. объемноцентрированная	2	8	3,0338	—	2,627	2,6274	1,313
Висмут	Bi	Ромбоэдрическая	2	3,3	4,7356	—	57°14,2′	3,1036	1,552
Вольфрам α	W	Кубическая	8	—	5,038	—	—	2,519	1,26
Вольфрам β	W	Кубическая объемноцентрированная	2	—	3,1586	—	—	2,7354	1,367
Железо α	Fe	Кубич. объемноцентрированная	2	—	2,8610	—	—	2,4777	1,238
Железо γ	Fe	Кубич. гранецентрированная	4	—	3,564	—	—	2,520	1,26
Железо δ (1425°)	Fe	Кубич. объемноцентрированная	—	—	2,93	—	—	2,53	—
Золото	Au	Кубич. гранецентрированная	4	12	4,0700	—	—	2,8779	1,439
Индий	In	Тетрагональная гранецентрированная	4	4,8	4,585	—	4,941	3,242	1,62
Иридий	Ir	Кубич. гранецентрированная	4	—	3,8312	—	—	2,7091	1,354
Кадмий	Cd	Гексагональная плотная	—	6,6	2,9731	—	5,6069	2,9731	1,486
Калий	K	Кубич. объемноцентрированная	2	—	5,333	—	—	4,618	2,30
Кальций α	Ca	Кубич. гранецентрированная	4	12	5,560	—	—	3,932	1,96
Кальций γ (460°)	Ca	Гексагональная плотная	2	6,6	3,94	—	6,46	3,94	1,97
Кобальт α	Co	Гексагональная плотная	2	—	2,507	—	4,072	2,499	1,25
Кобальт β	Co	Кубич. гранецентрированная	4	—	3,545	—	—	2,506	1,25
Кремний	Si	Кубическая (типа алмаза)	8	4	5,4173	—	—	2,3457	1,172
Лантан α	La	Гексагональная плотная	2	6,6	3,75	—	6,06	3,73	1,86
Лантан β	La	Кубич. гранецентрированная	4	12	5,296	—	—	3,754	1,87
Литий	Li	Кубич. объемноцентрированная	2	8	3,5019	—	—	3,033	1,52
Магний	Mg	Гексагональная плотная	2	6,6	3,2022	—	5,1991	3,1899	1,595
Марганец α	Mn	Кубическая	58	—	8,894	—	—	1,065	1,24
Марганец β	Mn	Кубическая	20	—	6,300	—	—	2,368	1,26
Марганец γ	Mn	Тетрагональная гранецентрированная	4	—	3,774	—	3,526	2,582	1,29
Медь	Cu	Кубич. гранецентрированная	4	12	3,6080	—	—	2,5512	1,275
Молибден	Mo	Кубич. объемноцентрированная	2	8	3,1403	—	—	2,7196	1,360
Мышьяк	As	Ромбоэдрическая (358° C)	2	3,3	4,135	—	54°7,5′	2,507	1,254
Мышьяк	As	Ромбоэдрическая гранецентрированная	8	—	5,59	—	—	2,507	1,254
Натрий	Na	Кубич. объемноцентрированная	2	8	4,30	—	—	3,708	1,86
Никель α	Ni	Гексагональная плотная	2	—	2,49	—	4,08	2,49	1,25
Никель β	Ni	Кубич. гранецентрированная	4	—	3,5169	—	—	2,4868	1,243
Ниобий	Nb	Кубич. объемноцентрированная	2	8	3,2941	—	—	2,8527	1,426
Олово (серое) α	Sn	Кубическая алмазная	8	—	6,46	—	—	2,80	1,40

Продолжение табл. 4

Название металла	Символ	Тип решетки	Число атомов в элементарной ячейке	Координационное число	Постоянные решетки в Å			Междуатомное расстояние (ближайшее) в Å	Атомный радиус в Å
					a	b	c или угол между осями		
Олово (белое) β	Sn	Тетрагональная объемноцентрированная	4	4,2	5,8194	—	3,1753	3,0161	1,508
Осмий	Os	Гексагональная плотная	2	—	2,7298	—	4,3104	2,670	1,335
Палладий	Pd	Кубич. гранецентрированная	4	—	3,8817	—	—	2,7448	1,372
Платина	Pt	Кубич. гранецентрированная	4	—	3,9158	β = 92°	—	2,7689	1,384
Рений	Re	Гексагональная плотная	2	—	2,7553	—	4,4493	2,7349	1,367
Родий α	Rh	Кубическая	48	—	9,21	—	—	—	—
Родий β	Rh	Кубич. гранецентрированная	4	—	3,7956	—	—	2,6839	1,342
Рубидий (—179°)	Rb	Кубич. объемноцентрированная	2	8	5,65	—	—	4,87	2,43
Рутений α	Ru	Гексагональная плотная	2	—	2,6987	—	4,2740	2,6447	1,322
Свинец	Pb	Кубич. гранецентрированная	4	12	4,9389	—	—	3,4924	1,746
Селен	Se	Гексагональная	3	2,4	4,337	—	4,944	2,316	1,158
Селен α	Se	Моноклинная	32	—	8,992	91°34′	11,52	—	—
Селен β	Se	Моноклинная	32	—	12,74	8,04	9,25	—	—
Сера α (желтая)	S	Ромбическая гранецентрированная	128	—	10,48	83°16′	24,55	2,12	1,06
Сера (103°) β	S	Моноклинная	—	—	10,90	11,02	10,96	—	—
Серебро	Ag	Кубич. гранецентрированная	4	12	4,0778	—	—	2,8835	1,441
Стронций	Sr	Кубич. гранецентрированная	4	12	6,075	—	—	4,296	2,148
Сурьма	Sb	Ромбоэдрическая	2	3,3	4,4976	—	57°6,5′	2,8795	1,439
Таллий α	Tl	Гексагональная плотная	2	6,6	3,450	—	5,520	3,404	1,702
Таллий β	Tl	Кубич. гранецентрированная	4	12	4,841	—	—	3,423	1,712
Тантал	Ta	Кубич. объемноцентрированная	2	8	3,2959	—	—	2,8544	1,427
Теллур	Te	Гексагональная	3	2,4	4,445	—	5,912	2,858	1,429
Титан α	Tl	Гексагональная плотная	2	6,6	2,953	—	4,729	2,915	1,458
Титан (900°) β	Ti	Кубич. объемноцентрированная	—	—	3,32	—	—	2,88	—
Торий	Th	Кубич. гранецентрированная	4	12	5,077	—	—	3,590	1,795
Углерод (алмаз)	C	Кубическая (алмазная)	8	4	3,561	—	—	1,511	0,771
Углерод (графит)	C	Гексагональная	4	6	2,46	—	6,78	1,42	0,71
Уран α	U	Моноклинная гранецентрированная	—	—	2,852	5,863	4,945	2,76	1,415
Фосфор (черный)	P	Ромбическая	8	3,3	3,31	4,38	10,50	2,17	1,085
Хром α	Cr	Кубич. объемноцентрированная	2	8	2,8786	—	—	2,4929	1,246
Хром β	Cr	Гексагональная плотная	2	6,6	2,717	—	4,418	2,709	1,355
Хром γ	Cr	Кубическая	58	—	8,717	—	—	1,043	1,222
Цезий (—173°)	Cs	Кубич. объемноцентрированная	2	8	6,05	—	—	5,24	2,62
Церий α	Ce	Гексагональная плотная	2	6,6	3,65	—	5,91	3,63	1,815
Церий β	Ce	Кубич. гранецентрированная	4	12	5,143	—	—	3,637	1,818
Цинк α	Zn	Гексагональная плотная	2	6,6	2,6595	—	4,9368	2,6595	1,329
Цирконий α	Zr	Гексагональная плотная	2	6,6	3,223	—	5,123	3,166	1,583
Цирконий β (867°)	Zr	Кубич. объемноцентрированная	2	8	3,61	—	—	3,13	1,56

Таблица 5

Давления паров важнейших элементов [5]

Название элемента	Давление паров в *мм* рт. ст.									
	1	5	10	20	40	60	100	200	400	760
	Температура в °С									
Азот	−226,1	−221,3	−219,1	−216,8	−214	−212,3	−209,7	−205,6	−200,9	−195,8
Алюминий	1284	1421	1487	1555	1635	1684	1749	1844	1947	2056
Аргон	−218,2	−213,9	−210,9	−207,9	−204,9	−202,9	−200,5	−195,6	−190,6	−185,6
Барий	—	984	1049	1120	1195	1240	1301	1403	1518	1638
Бром	− 48,7	− 32,8	− 25,0	− 16,8	−8,0	−0,6	+9,3	24,3	41,0	58,2
Висмут	1021	1099	1136	1177	1217	1240	1271	1319	1370	1420
Водород	−263,3	−261,9	−261,3	−260,4	−259,6	−258,9	−257,9	−256,3	−254,5	−252,5
Вольфрам	3990	4337	4507	4650	4886	5007	5168	5403	5666	5927
Гелий	−271,7	−271,5	−271,3	−271,1	−270,7	−270,6	−270,3	−269,8	−269,3	−268,6
Железо	1787	1957	2039	2128	2224	2283	2360	2475	2605	2735
Золото	1869	2059	2154	2256	2363	2431	2521	2657	2807	2966
Иод	38,7	62,2	73,2	84,7	97,5	105,4	116,5	137,3	159,8	183,0
Кадмий	394	455	484	516	553	578	611	658	711	765
Калий	341	408	443	483	524	550	586	643	708	774
Кальций		926	983	1046	1111	1152	1207	1288	1388	1487
Кислород	−219,1	−213,4	−210,6	−207,5	−204,1	−201,9	−198,8	−194,0	−188,8	−183,1
Кремний	1724	1835	1888	1924	2000	2036	2083	2151	2220	2287
Литий	723	828	881	940	1003	1042	1097	1178	1273	1372
Магний	621	702	743	789	838	868	909	967	1034	1107
Марганец	1292	1434	1505	1583	1666	1720	1792	1900	2029	2151
Медь	1628	1795	1879	1970	2067	2127	2207	2325	2465	2595
Молибден	3102	3393	3535	3690	3859	3964	4109	4322	4553	4804
Мышьяк	372	416	437	459	483	498	518	548	579	610
Натрий	439	511	549	589	633	662	701	758	823	892
Никель	1810	1979	2057	2143	2234	2289	2364	2473	2603	2732
Олово	1492	1634	1703	1777	1855	1903	1968	2063	2169	2270
Платина	2730	3007	3146	3302	3469	3574	3714	3923	4169	4407
Ртуть	126,2	164,8	184,0	204,6	228,8	242,0	261,7	290,7	323,0	357,0
Рубидий	297	358	389	422	459	482	514	563	620	679
Свинец	973	1099	1162	1234	1309	1358	1421	1519	1630	1744
Селен	356	413	442	473	506	527	554	594	637	680
Сера	183,8	223	243,8	264,7	288,3	305,5	327,2	359,7	399,6	444,6
Серебро	1357	1500	1575	1658	1743	1795	1865	1971	2090	2212
Стронций		847	898	953	1018	1057	1111	1192	1285	1384
Сурьма	886	984	1033	1084	1141	1176	1223	1288	1364	1440
Таллий	825	931	983	1040	1103	1143	1196	1274	1364	1457
Теллур	520	605	650	697	753	789	838	910	997	1087
Углерод	3586	3828	3946	4069	4196	4273	4373	4516	4660	4827
Фосфор (желтый)	76,6	111,2	128,0	146,2	166,7	179,8	197,3	222,7	251,0	280,0
Фосфор (фиолет.)	237	271	287	306	323	334	349	370	391	417
Фосфор (черный)	290	323	338	354	371	381	393	413	432	453
Фтор	−223	−216,9	−214,1	−211,0	−207,7	−205,5	−202,7	−198,3	−193,2	−187,9
Хлор	−118	−106,7	−101,6	− 93,3	− 84,5	− 79,0	− 71,7	− 60,2	− 47,3	− 33,8
Хром	1616	1768	1845	1928	2013	2067	2139	2243	2361	2482
Цезий	279	341	375	409	449	474	509	561	624	690
Цинк	487	558	593	632	673	700	736	788	844	907

Таблица 6

Растворимость водорода в металлах, образующих с водородом истинные твердые растворы, в зависимости от температуры ([4], [6], [7], [8], [9])

Температура в °С	Растворимость в *см*³ на 100 *Г* металла при 1 *атм*								
	Алюминий	Железо	Кобальт	Медь	Молибден	Никель	Платина	Серебро	Хром
200	—	—	—	—	—	1,70	—	—	—
300	—	0,16	—	—	—	2,35	—	—	—
400	—	0,35	—	0,06	0,165	3,15	0,065	0,055	—
500	—	0,75	—	0,16	0,175	4,10	—	0,110	—
600	—	1,20	0,89	0,30	0,185	5,25	0,075	0,176	0,5
700	0,15	1,85	1,22	0,49	0,21	6,50	—	0,232	—
800	0,49	2,45	1,85	0,72	0,25	7,75	0,095	0,334	1,0
900	1,48	3,0(α) 4,7(γ)	2,52	1,08	0,29	9,10	0,135	0,427	2,0
1000	3,0	5,50	3,21	1,58	0,50	9,80	0,20	—	3,0
1100	—	7,00	4,33	6,3(ж)	0,62	12,15	0,35	—	4,2
1200	—	8,25	5,44	8,1	—	14,25	0,52	—	—
1300	—	10,10	—	10,0	—	14,7	0,77	—	—
1400	—	10,5(γ) 10,1(δ)	—	11,8	—	16,2	1,15	—	—
1500	—	—	—	13,6	—	41,6 (ж)	—	—	—
1535	—	14 (δ) 25 (ж)	—	—	—	—	—	—	—
1600	—	28	—	—	—	43,1	—	—	—
1650	—	31	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Водород практически не растворим в золоте, кадмии, индии, таллии и цинке.

Таблица 7

Растворимость водорода в металлах, образующих с водородом псевдогидриды, в зависимости от температуры ([4], [7], [8], [9])

Температура в °С	Растворимость в *см*³ на 100 *Г* металла при 1 *атм*								
	Ванадий	Лантан	Ниобий	Палладий	Тантал	Титан	Торий	Церий	Цирконий
20	15 000	22 300	5500	6000	4600	40 740	14 800	20 500	23 550
300	6 500	19 200	4440	330	3300	—	—	18 400	—
400	3 800	18 200	3680	230	2500	38 770	—	17 600	—
500	1 900	17 200	2270	190	1400	36 600	—	16 800	—
600	1 000	16 300	988	180	700	33 470	9 100	16 000	18 400
700	640	15 300	511	170	420	18 390	8 800	15 200	17 600
800	440	14 300	330	162	250	14 090	8 100	14 500	16 500
900	320	13 400	217	157	180	9 820	7 700	13 800	13 800
1000	250	12 300	163	155	140	6 610	2 600	13 000	7 800
1100	210	11 100	—	154	110	4 590	1 900	11 300	4 700
1200	—	4 100	—	—	100	—	1 750	5 300	3 200

Таблица 8

Растворимость кислорода в металлах в зависимости от температуры ([4], [7], [8], [9])

Температура в °С	Растворимость в *см*³ на 100 *Г* металла при 1 *атм*	Температура в °С	Растворимость в *см*³ на 100 *Г* металла при 1 *атм*	Температура в °С	Растворимость в *см*³ на 100 *Г* металла при 1 *атм*
Серебро		*Кобальт*		*Медь*	
200	1,3	600	4,2	600	5,0
300	0,924	700	6,3	800	6,6
400	0,828	810	11,2	945	7,0
500	0,905	875	7,0	1050	10,9
600	1,26	945	4,9	*Железо*	
700	1,84	1000	5,6	1530	147
800	3,37	1200	9,1	1730	336
923	5,43			*Никель*	
973(ж)	213,5			1450	168
1024	205,0				
1075	193,9				
1125	184,9				

Таблица 9

Растворимость азота в чистых металлах в зависимости от температуры ([4], [7], [8], [9])

Растворимость в *см*³ на 100 *Г* металла при давлении 1 *атм*											
760 *мм* Hg		758 *мм* Hg		754 *мм* Hg		744 *мм* Hg		760 *мм* Hg		760 *мм* Hg	
Температура в °С	Железо	Температура в °С	Железо	Температура в °С	Железо	Температура в °С	Железо	Температура в °С	Молибден	Температура в °С	Вольфрам
750	0,32	805	1,1	1200	19,2	1310	17,4	1200	0,84	1200	0,001
890	1,60	840	4,6	1300	18,2	1380	17,1	1600	3,44	1600	0,015
900	20,0	920	9,3	1390	17,2	1440	8,8	2000	8,4	2000	0,088
1540	24,6	1070	19,0	1400	13,9	1460	10,5	2400	16,0	2400	0,304
1560	27	1300	16,8	1450	9,3	1500	9,7	—	—	—	—
—	—	1390	16,6	—	—	1540	24,6	—	—	—	—
—	—	1400	10,6	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	1420	8,1	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	1460	8,5	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Азот практически не растворим в золоте, серебре, меди и кобальте. В алюминии в расплавленном состоянии растворимость азота достигает 1 *см*³ на 100 *г* алюминия.

В табл. 5—9 приводятся сведения о давлении паров металлов и растворимости газов в металлах при различных температурах ([4], [5], [6], [7], [8], [9]). Кроме того, в указанных таблицах помещены данные о свойствах некоторых неметаллических и газообразных элементов, играющих особенно важную роль в металлургических и технологических процессах.

В табл 10—12 содержатся сведения, характеризующие механические свойства важнейших чистых металлов при высоких и низких температурах ([2], [3], [6] — [12]).

Таблица 10

Механические свойства чистых металлов при комнатной температуре
([3], [7], [8], [9], [12])

Название металла	Символ	Предел прочности при растяжении в *кГ/мм²*	Предел упругости в *кГ/мм²*	Предел текучести в *кГ/мм²*	Относительное удлинение в %	Относительное сужение в %	Модуль нормальной упругости в *кГ/мм²*	Числа твердости		
								по Бринелю	по Шору	по шкале Мооса
Алюминий	Al	8—11	3,0	3—7	40	85	7 200	20—35	4,5	2,9
Бериллий	Be	14	6	—	0,0	—	30 000	140	—	6,5
Висмут	Bi	0,5—2,0	—	—	0,0	0,0	3 200	9	—	2
Вольфрам	W	120—140	—	75	0		42 000	350	—	7
Железо	Fe	25—33	12	12,5	25—55	70—85	21 000	50	8	4,5
Золото	Au	14	1—2	3—4	30—50	90	7 900	18	3,5	2,5
Индий	In	1—1,5	—	0,5	50	95	1 070	1	—	1,2
Иридий	Ir	23	—	—	2	—	52 000	170	—	6,5
Кадмий	Cd	6,4	0,3	1	20	50	5 300	20	6	—
Калий	K	—	—	—	—	—	—	0,04	—	2
Кальций	Ca	6	0,4	3,8	50	—	2 600	20—30	—	0,5
Кобальт	Co	24	—	—	5	—	20 750	125	—	2,3
Кремний	Si	—	—	—	0	0	11 450	240	—	5
Литий	Li	11,8	—	—	50—70	—	500	—	—	6,5
Магний	Mg	17—20	1,2	2—6	15	20	4 360	25	—	0,6
Марганец (α и β)	Mn	Хрупкий	—	—	—	—	20 160	210	—	2
Марганец (γ)	Mn	50	13,5	13,5	40	—	—	310	—	6
Медь	Cu	22	1,5	6—8	60	75	13 200	35	7	—
Молибден	Mo	70	—	—	30	—	33 000	125	—	3
Натрий	Na	—	—	—		—	—	0,1	—	8,5
Никель	Ni	40—50	8	12	40	70	20 500	60—80	10	0,4
Ниобий	Nb	35	—	—		30	—	250	—	5
Олово	Sn	2—4	0,15	—	40	75	5 500	5	—	6
Осмий	Os	—	—	—	—	—	56 700	400	—	1,8
Палладий	Pd	20	—	—	55	90	12 360	30	—	7
Платина	Pt	15	—	—	50	90	17 000	25	10	4,8
Родий	Rh	50	—	—	7	—	38 000	130	—	4,3
Рубидий	Rb	—	—	—	—	—	—	0,1	—	6
Свинец	Pb	1,8	0,25	0,5—1	50	100	1 700	4—6	2	0,3
Серебро	Ag	18	3	3,5	50	90	8 100	25	4	1,5
Сурьма	Sb	0,5—1	—	—	0	0	800	30—60	—	2,7
Таллий	Tl	0,9	—	—	35	100	810	3	—	3
Тантал	Ta	90—115	—	—	1—5	—	19 000	70	—	1,2
Теллур	Te	0,9	—	—	35	100	4 000	3	—	7
Торий	Th	56	—	—	—	—	7 970	40	—	2,3
Титан	Ti	60	—	44	28	—	10 500	230	—	—
Хром (литой)	Cr	Хрупкий	—	—	—	—	25 200	220	—	—
(электроосажд.)	Cr	Хрупкий	—	—	—	—	—	~650	—	4,5
Церий	Ce	8,5	0,25	—	—	—	—	~21	—	2,5
Цинк	Zn	11—15	—	9—10	5—20	—	9 400	30—42	8	2,5
Цирконий	Zr	95 (проволока)	—	—	—	—	7 000	82	45	6,5

Таблица 11

Механические свойства чистых металлов при высоких температурах
([2], [6], [7], [8], [9], [11])

Название металла	Температура испытания в °С	Истинное сопротивление разрушению при растяжении в *кГ/мм²*	Предел прочности при растяжении в *кГ/мм²*	Относительное удлинение в %	Относительное сужение в %	Число твердости по Бринелю
Алюминий деформированный и отожженный при 350° С	20	14,30	11,00	20—40	85	37
	75	13,10	10,60	24	83	34
	135	11,30	7,65	32	88	31
	310	4,25	2,60	39	97	13
	400	2,15	1,25	42	99	6,4
	510	1,00	0,55	45	99	3,5
	600	0,60	0,35	42	100	1,6
Железо деформированное и отожженное при 900° С	20	42,50	33,40	21,00	68	—
	225	45,0	43,00	4,00	57	—
	275	48,00	44,50	7,00	51	—
	335	45,10	37,10	18,00	61	—
	400	34,00	27,00	21,00	68	—
	620	13,80	7,60	45,00	95	—
	800	3,75	2,30	39,00	89	—
	835	3,60	2,20	39,00	88	—
	1000	—	2,90	—	—	—
	1100	—	2,70	—	—	—
	1200	—	1,30	—	—	—
Кадмий деформированный и отожженный при 100° С	20	7,75	6,40	20	50	20
	130	3,70	2,45	34	59	6,5
	237	1,00	0,55	45	44	2,7
Магний деформированный и отожженный при 350° С	20	17,00	17,00	—	—	—
	83	14,80	13,40	10	13	—
	175	10,40	6,75	35	45	—
	273	5,45	2,95	46	76	—
	355	3,20	1,60	50	87	—
	550	0,5	0,3	40	100	—

Продолжение табл. 11

Название металла	Температура испытания в °С	Истинное сопротивление разрушению при растяжении в $кГ/мм^2$	Предел прочности при растяжении в $кГ/мм^2$	Относительное удлинение в %	Относительное сужение в %	Число твердости по Бринелю
Медь деформированная и отожженная при 600° С	20	33,50	22,00	32—60	65—75	41
	160	26,60	18,40	32	71	—
	300	18,70	13,20	30	50	37
	410	10,50	8,50	19	24	—
	500	—	—	—	—	35
	555	5,65	4,85	14	19	—
	650	3,90	3,30	15	20	—
	790	2,20	1,90	14	34	—
	970	0,85	0,80	6	15	—
Никель деформированный и отожженный при 900° С	20	66,50	49,30	26—40	70	60
	195	60,20	44,80	26	66	—
	300	64,60	44,80	31	67	—
	455	37,70	30,20	20	31	—
	593	24,40	20,60	16	25	—
	800	10,30	9,20	11	18	—
	1000	4,50	4,00	11	15	—
	1100	2,80	2,50	11	24	—
Олово деформированное и отожженное при 50° С	20	4,55	2,75	40	74	7,6
	50	3,20	1,75	45	72	6,0
	100	1,90	1,05	45	82	4,1
	150	1,10	0,65	41	97	2,5
	180	0,50	0,45	10	12	1,8
	207	0,25	0,25	0	0	1,4
Свинец деформированный и отожженный при 100° С	20	1,95	1,35—1,80	35—50	100	5,00
	82	1,05	0,80	24	100	3,00
	150	0,75	0,50	33	100	1,44
	195	0,50	0,40	20	100	1,20
	265	0,25	0,20	20	100	0,70
Цинк деформированный и отожженный при 200° С	20	11,90	11,30	5	—	42,0
	112	7,85	7,25	8	15	25,0
	150	5,35	5,00	7	10	—
	247	2,40	2,25	6	11	6,7
	330	1,35	1,25	8	15	2,2
	405	~0,03	~0,03	2	2	1,4

Таблица 12

Механические свойства чистых металлов при низких температурах ([2], [7], [8], [9])

Название металла	Температура испытания в °С	Предел прочности при растяжении в *кГ/мм²*	Предел текучести в *кГ/мм²*	Предел пропорциональности в *кГ/мм²*	Относительное удлинение в %	Относительное сужение в %	Ударная вязкость в *кГм/см²*	Число твердости по Бринелю
Алюминий отожженный при 380° С	+ 20	8—11	3,60	3,0	45,4	89,3	9,30	31—37
	— 40	7,90	4,10	3,5	43,0	89,3	10,71	32
	— 70	8,90	4,20	3,7	42,2	87,0	11,54	35
	—100	—	—	—	—	—	13,72	—
	—195	21,00	—	—	42,0	75,0	16,29	—
	—253	35,00	—	—	45,0	66,0	—	—
Железо „армко"	+ 20	30—33	16,0	—	21—46	65—74	21—24	80—120
	— 40	—	—	—	—	—	8,0	—
	— 70	33,0	23,0	—	45,0	72	2,0	77
	—100	—	—	—	—	—	1,0	—
	—195	63,0	58,0	—	16,0	53	0	259
Кадмий отожженный	+ 20	3,4—6,0	—	—	20—46	50	10,40	20
	— 40	6,30	—	—	42,6	—	7,49	—
	— 70	7,50	—	—	37,9	—	—	—
	—100	—	—	—	—	—	3,83	—
	—195	—	—	—	—	—	0,84	—
Медь деформированная	+ 20	30,0	29,3	24,7	18,2	70,6	10,95	89
	— 40	33,5	31,6	28,8	23,3	68,5	12,33	96
	— 70	43,5	32,2	28,8	23,7	69,2	12,73	100
	—100	—	—	—	—	—	14,03	—
	—183	41,3	35,0	—	63,5	—	15,20	105
	—253	46,0	—	—	48,0	74	12,80	—
Никель электролитический отожженный	+ 20	50	19,5	15	26—40	70	18—32	100
	—183	88	—	—	42	62	32,70	159
	—253	79	—	—	48	69	22,10	—
Олово литое	+ 17	3,6	—	—	29	91	—	—
	—196	7,1	—	—	4	4	—	—
	—253	7,3	—	—	0,6	0	—	—
Свинец отожженный	+ 20	1,8—2,1	—	—	33—50	100	0,6—2,3	4,3—5,0
	—183	4,4	—	—	40,3	—	3,7	9,0
	—253	7,1	—	—	36,0	—	4,4	—
Цинк деформированный	+ 20	11—30	10,6	8,9	5—9	14,2	0,53	42
	— 40	14,2	12,8	11,1	1,8	5,8	0,22	—
	— 70	15,0	13,2	11,7	2,0	—	0,16	—
	—100	—	—	—	—	—	0,16	—
	—195	—	—	—	—	—	0,12	—

ЛИТЕРАТУРА

1. Барретт Ч. С., Структура металлов, Металлургиздат, 1948.
2. Беляев С. Е., Механические свойства авиационных материалов при низких температурах, Оборонгиз, 1940.
3. Бурхардт А., Механические и технические свойства чистых металлов, ГОНТИ, 1941.
4. Дэшман С., Научные основы вакуумной техники, Изд. иностр. лит., М. 1950.
5. Кэй Д. и Лэби Т., Справочник физика-экспериментатора, 1949.
6. Славинский М. П., Физико-химические свойства элементов, Металлургиздат, 1952.
7. Смирягин А. П., Справочник машиностроителя, том I, гл. XIX, Машгиз, 1950.
8. Смирягин А. П., Энциклопедический справочник „Машиностроение", том 3, гл. V, Машгиз, 1947.
9. Смирягин А. П., Промышленные цветные металлы и сплавы, Металлургиздат, 1949.
10. Справочник по рентгеноструктурному анализу под ред. А. И. Китайгородского, Гостехиздат, 1940.
11. Guertler W., Metalltechnisches Taschenbuch, Leipzig, 1939.
12. Metals Handbook, Amer. Soc. for Metals, Cleveland (Ohio), 1948.

ГЛАВА XII

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

В табл. 1—3 приведены единицы абсолютной практической рацианализированной системы МКСА, а также соотношения между электрическими и общетехническими единицами мощности, энергии и работы.

Таблица 1

Единицы абсолютной практической рационализированной системы МКСА

Величина	Наименование	Размерность	Обозначение		Содержит единиц нерационализированных систем СГС		
			русскими буквами	латинскими и греческими буквами	СГСЭ	СГСМ	СГС — симметричная (гауссова)
			1. Основные единицы				
Длина	Метр	*м*	*м*	m	10^2 (*см*)	10^2 (*см*)	10^2 (*см*)
Масса	Килограмм	*кг*	*кг*	kg	10^3 (*г*)	10^3 (*г*)	10^3 (*г*)
Время	Секунда	сек.	сек.	sec	1 (сек)	1 (сек)	1 (сек)
Ток	Ампер	*а*	*а*	A	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
			2. Механические единицы				
Скорость	Метр в секунду	*м/сек*	*м/сек*	m/sec	10^2 (*см/сек*)	10^2 (*см/сек*)	10^2 (*см/сек*)
Ускорение	Метр в секунду за секунду	*м/сек²*	*м/сек²*	m/sec²	10^2 (*см/сек²*)	10^2 (*см/сек²*)	10^2 (*см/сек²*)
Энергия и работа	Джоуль или ватт-секунда	*дж*	*дж*	J	10^7 (*эрг*)	10^7 (*эрг*)	10^7 (*эрг*)
Сила	Ньютон	*дж/м*	*н*	N	10^5 (*дн*)	10^5 (*дн*)	10^5 (*дн*)
Мощность	Ватт	*дж/сек*	*вт*	W	10^7	10^7	10^7
			3. Электрические единицы				
Количество электричества	Кулон	*к*	*к*	C	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	Совпадает с системой СГСЭ
Разность электрических потенциалов, напряжение, э. д. с.	Вольт	*в*	*в*	V	$\frac{1}{300}$	10^8	

Продолжение табл. 1

Величина	Наименование	Размерность	Обозначение		Содержит единиц нерационализированных систем СГС		
			русскими буквами	латинскими и греческими буквами	СГСЭ	СГСМ	СГС — симметричная (гауссова)
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	*в/м*	*в/м*	V/m	$\frac{1}{3}\cdot 10^{-4}$	10^{6}	
Электрическое смещение	Кулон на квадратный метр	*к/м²*	*к/м²*	C/m²	$4\pi\cdot 3\cdot 10^{5}$	$4\pi 10^{-5}$	
Поляризация	Кулон на квадратный метр	*к/м²*	*к/м²*	C/m²	$3\cdot 10^{5}$	10^{-5}	
Электрическая емкость	Фарада	*сек/ом*	*ф*	F	$9\cdot 10^{11}$	10^{-9}	Совпадает с системой СГСЭ
Плотность тока	Ампер на квадратный метр	*а/м²*	*а/м²*	A/m²	$3\cdot 10^{5}$	10^{-5}	
Электрическое сопротивление	Ом	*в/а*	*ом*	Ω	$\frac{1}{9}\,10^{-11}$	10^{9}	
Удельное сопротивление	Ом, умноженный на метр	*ом·м*	*омм*	Ωm	$\frac{1}{9}\cdot 10^{-9}$	10^{11}	
Удельная проводимость	Единица, деленная на ом, умноженный на метр	1/*ом·м*	1/*омм*	$\frac{1}{\Omega m}$	$9\cdot 10^{9}$	10^{-11}	
4. Магнитные единицы							
Магнитный поток	Вольтсекунда	*всек*	*всек*	Vsec	$\frac{1}{300}$	10^{8} (*мкс*)	
Магнитная индукция	Вольтсекунда на квадратный метр	*всек/м²*	*всек/м²*	$\frac{\text{Vsec}}{\text{m}^2}$	$\frac{1}{3}\,10^{-6}$	10^{4} (*гс*)	
Намагниченность	Ампер на метр	*а/м*	*а/м*	A/m	$3\cdot 10^{7}$	10^{-3} (*гс*) (или *эрстед*)	Совпадает с системой СГСМ
Напряженность магнитного поля	Ампер на метр	*а/м*	*а/м*	A/m	$4\pi\cdot 3\cdot 10^{7}$	$4\pi\cdot 10^{-3}$ (*эрстед*)	
Индуктивность, взаимная индуктивность	Генри	*ом·сек*	*гн*	H	$\frac{1}{9}\,10^{-11}$	10^{9}	

Примечание. В технической литературе и в учебных пособиях и учебниках иногда применяются вместо указанных в таблице нижеследующие единицы измерений:

напряженность электрического поля — в вольтах на сантиметр (*в/см*);

электрическое смещение — в кулонах на квадратный сантиметр (*к/см²*);

плотность тока — в амперах на квадратный миллиметр (*а/мм²*);

удельное сопротивление — ом, умноженный на сантиметр (*омсм*);

удельная проводимость — единица, деленная на ом, умноженный на сантиметр $\left(\frac{1}{омсм}\right)$;

магнитный поток — в максвеллах (*мкс*); 1 максвелл (*мкс*) $= 10^{-8}$ *всек*;

магнитная индукция — в вольтсекундах на квадратный сантиметр (*всек/см²*) и гауссах;

напряженность магнитного поля — в амперах на сантиметр (*а/см*).

Иногда напряженность магнитного поля выражают в абсолютных электромагнитных единицах — эрстедах: 1 эрстед $= 0{,}8$ *а/см*.

Таблица 2

Соотношения между электрическими и общетехническими единицами мощности

Киловатт	Лошадиная сила метрическая	Лошадиная сила английская	*кГм/сек*	*эрг/сек*
1	1,36	1,34	102,0	10^{10}
0,736	1	0,986	75	$7{,}36 \cdot 10^{9}$
0,746	1,0138	1	76,04	$7{,}46 \cdot 10^{9}$
0,981	1,333	1,315	100	$9{,}81 \cdot 10^{9}$
10^{-4}	$1{,}36 \cdot 10^{-4}$	$1{,}34 \cdot 10^{-4}$	$1{,}02 \cdot 10^{-2}$	10^{3}

Таблица 3

Соотношение между электрическими и общетехническими единицами энергии и работы

Киловатт-час	Ватт-сек (джоуль)	*кГм*	Лошадиная сила-час метрическая	Килограмм-калория	Британская термическая единица BTU
1	$36 \cdot 10^{5}$	$36{,}7 \cdot 10^{4}$	1,36	860	3411
$2{,}78 \cdot 10^{-4}$	1000	102	$3{,}78 \cdot 10^{-4}$	0,239	0,948
$2{,}72 \cdot 10^{-4}$	981	100	$3{,}7 \cdot 10^{-4}$	0,234	0,929
0,736	$26{,}5 \cdot 10^{5}$	$27 \cdot 10^{4}$	1	632,5	2509
$1{,}16 \cdot 10^{-3}$	4187	427	$1{,}58 \cdot 10^{-3}$	1	3,97
$0{,}293 \cdot 10^{-3}$	1055	107,6	$3{,}99 \cdot 10^{-4}$	0,252	1

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. КОНДЕНСАТОРЫ

Электрическое поле в диэлектриках

Закон Кулона для точечных зарядов

$$F = \frac{QQ_1}{4\pi\varepsilon R^2} \text{ н},$$

где F — сила взаимодействия зарядов в ньютонах; Q, Q_1 — заряды в кулонах; $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon'$ — диэлектрическая проницаемость среды в *ф/м*, причем $\varepsilon_0 = 8{,}86 \times \times 10^{-12}$ *ф/м* — диэлектрическая проницаемость пустоты; ε' — относительная диэлектрическая проницаемость (см. табл. 11, стр. 344).

Напряженность электрического поля E — отношение силы воздействия поля на заряженное тело к величине заряда этого тела:

$$E = \frac{F}{Q_1} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon R^2} \text{ в/м}.$$

Здесь Q — заряд, создающий поле напряженностью E в точке расположения заряда Q_1.

Электрическая прочность — предельное значение напряженности электрического поля, при которой наступает пробой диэлектрика, т. е. электрический разряд через него и его местное разрушение (см. табл. 11).

Поток вектора напряженности поля сквозь поверхность S

$$N = \int_S E dS_n \text{ в} \cdot \text{м},$$

где E — вектор напряженности поля; dS_n — элементарная площадка, нормальная вектору напряженности E.

Для равномерного поля

$$N = ES_n \text{ в} \cdot \text{м}.$$

Теорема Гаусса. Поток вектора напряженности поля, создаваемого электрическими зарядами, сквозь окружающую эти заряды замкнутую поверхность пропорционален величине зарядов и не зависит ни от их расположения, ни от формы поверхности:

$$N = \frac{Q}{\varepsilon} \text{ в} \cdot \text{м}.$$

Потенциал электрического поля в данной его точке A — отношение потенциальной энергии, которой обладает за-

ряд Q в точке A электрического поля, к величине заряда:

$$\varphi_A = \frac{\Pi_A}{Q} \text{ в.}$$

Разность потенциалов двух точек A и B электрического равномерного поля напряженностью E, или напряжение U_{AB} между этими точками:

$$\varphi_A - \varphi_B = U_{AB} = El\cos(\overline{E}, l) \text{ в,}$$

где l — расстояние между точками A и B.

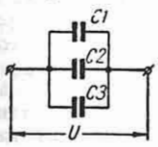
Конденсаторы

Конденсатор—совокупность двух проводников (электродов), разделенных диэлектриком.

Емкость конденсатора — отношение величины заряда каждого из электродов к напряжению между ними:

$$C = \frac{Q}{U} \text{ к/в или ф.}$$

Параллельное соединение конденсаторов (фиг. 1)



Фиг. 1.

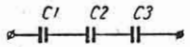
$$C = C1 + C2 + C3,$$

где C — результирующая емкость всей группы параллельно соединенных конденсаторов.

Последовательное соединение конденсаторов (фиг. 2)

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3},$$

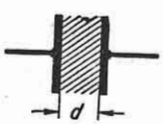
где C — результирующая емкость всей группы последовательно соединенных конденсаторов.



Фиг. 2.

Емкость плоского конденсатора (фиг. 3)

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} \text{ ф,}$$



Фиг. 3.

где d — толщина диэлектрика в $м$; S — поверхность электрода в $м^2$; ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика в $ф/м$.

Емкость цилиндрического конденсатора (фиг. 4)

$$C = \frac{2\pi l\varepsilon}{\ln\frac{d_2}{d_1}},$$

Фиг. 4.

где l — длина конденсатора в $м$.

Энергия электрического поля конденсатора

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} \text{ вт·сек,}$$

где Q — заряд в $к$; C — емкость в $ф$, U — напряжение между электродами конденсатора в $в$.

Заряд конденсатора (на фиг. 5 переключатель включен на верхние клеммы)

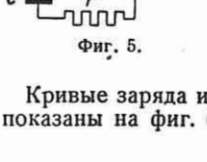
$$u_C = U\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

где u_C — напряжение в $в$ на электродах конденсатора через t сек. после начала заряда; e — основание натуральных логарифмов; $\tau = rC$ — постоянная времени цепи в сек.; r — сопротивление цепи в $ом$; C — емкость конденсатора в $ф$.

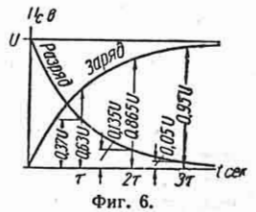
Разряд конденсатора (на фиг. 5 переключатель включен на нижние клеммы)

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где U_0 — напряжение на электродах конденсатора в момент начала разряда.



Фиг. 5.



Фиг. 6.

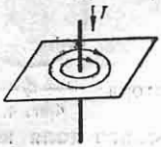
Кривые заряда и разряда конденсатора показаны на фиг. 6.

МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

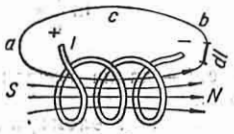
Магнитное поле

Направление магнитного поля совпадает с направлением северного конца магнитной стрелки, помещенной в этом поле.

Направление магнитного поля прямого тока, т. е. тока, текущего по прямому проводнику, определяется правилом буравчика (фиг. 7).



Фиг. 7. Магнитное поле прямого тока.



Фиг. 8. Соленоид.

Соленоид — последовательно соединенные кольцевые проводники, расположенные так, что оси их совпадают (фиг. 8).

Действие магнитного поля на проводник с током (фиг. 9). На элементарный проводник длиной dl, обтекаемый током I и помещенный в магнитном поле, действует сила dF, определяемая выражением

Фиг. 9.

$$dF = BI \sin \alpha \, dl,$$

где α — угол между направлением поля и направлением тока в проводнике; B — величина, характеризующая интенсивность магнитного поля и называемая магнитной индукцией.

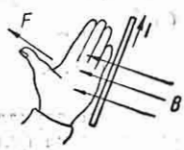
При равномерном поле и $\alpha = 90°$

$$F = BIl.$$

Магнитная индукция определяется выражением

$$B = \frac{F}{Il \sin \alpha} \quad в \cdot сек/м^2.$$

Правило левой руки (фиг. 10) служит для определения направления силы F, действующей на проводник с током, помещенный в магнитном поле. Если ладонь левой руки повернуть так, чтобы четыре вытянутые пальца совпали с направлением тока, а магнитное поле входило в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.



Фиг. 10.

Магнитный поток или поток вектора магнитной индукции сквозь поверхность S

$$\Phi = \int_S B dS_n \quad в \cdot сек,$$

где dS_n — элементарная площадка, нормальная к вектору магнитной индукции. При равномерном поле, направленном нормально к поверхности S,

$$\Phi = BS \quad в \cdot сек.$$

Магнитная проницаемость μ среды характеризует ее магнитные свойства:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad ом \cdot сек/м \text{ или } гн/м,$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6}$ $гн/м$ — магнитная проницаемость пустоты; μ_r — относительная магнитная проницаемость данной среды.

Для ферромагнитных тел (железо, чугун, сталь, никель) μ_r очень велика и достигает нескольких тысяч.

Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{B}{\mu} \quad а/м.$$

Закон полного тока (см. фиг. 8). Намагничивающая сила замкнутого контура равна пронизывающему его полному току:

$$\oint H \, dl = Iw.$$

Здесь abc — какая-либо магнитная силовая линия (замкнутый контур) катушки (соленоида); w — число витков катушки; I — ток катушки. $\oint H \, dl$ называется намагничивающей силой; произведение Iw — полный ток или число ампервитков катушки.

Электромагнитная индукция

Электромагнитная индукция заключается в том, что при изменении магнитного потока Φ, пронизывающего проводящий замкнутый контур, в последнем наводится (индуктируется) электродвижущая сила (э. д. с.).

Количественная связь между наведенной э. д. с. и изменением магнитного потока выражается уравнением $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ $в$, известным под названием закона электромагнитной индукции. Если катушка (проводящий контур) состоит из w последовательно соединенных витков, то

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad в.$$

Произведение потока Ф и числа витков w, обозначаемое ψ, называется потокосцеплением, и приведенное выше уравнение принимает более сжатый общий вид:

$$e = -\frac{d\psi}{dt}.$$

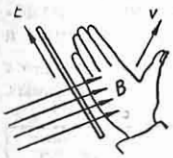
В частном случае, когда в равномерном магнитном поле, перпендикулярно к направлению его перемещается проводник, закон электромагнитной индукции выражается в преобразованном виде формулой

$$e = Blv \text{ в},$$

где B — магнитная индукция в $в \cdot сек/м^2$, l — длина проводника в $м$; v — скорость перемещения проводника в $м/сек$.

Закон Ленца (принцип Ленца) описывает свойства наведенного тока. Наведенная э. д. с. создает в замкнутом проводящем контуре ток такого направления, что его магнитное поле препятствует изменению наводящего магнитного потока. Если, например, ток в контуре возникает в результате уменьшения наводящего потока, пронизывающего контур, то магнитный поток наведенного тока будет пронизывать площадь контура в том же направлении, что и наводящий поток. Наоборот, если ток возникает в результате увеличения наводящего потока, магнитный поток наведенного тока будет пронизывать площадь контура в направлении, противоположном наводящему потоку.

Правило правой руки (фиг. 11) служит для определения направления наведенной э. д. с. в проводнике, движущемся в магнитном поле.



Фиг. 11.

Если ладонь правой руки повернуть навстречу и перпендикулярно к магнитному потоку, а вытянутый большой палец отставить по направлению движения проводника, то концы остальных четырех пальцев укажут направление наведенной э. д. с.

Самоиндукция — явление возникновения в проводнике, обтекаемом изменяющимся по величине током, индуктированной э. д. с., обусловленной магнитным потоком того же тока.

Величина э. д. с. самоиндукции

$$e_L = -L\frac{di}{dt} \text{ в}.$$

Здесь L — индуктивность цепи. Она выражается в $ом \cdot сек$ или $гн$ и представляет собой индуктивность такой цепи, в которой при равномерном изменении тока на 1 $а$ в секунду возникает э. д. с. самоиндукции, равная 1 $в$.

Если создаваемое проводником с током магнитное поле расположено в неферромагнитной среде, то индуктивность в этом случае является величиной постоянной для данной цепи. В других случаях индуктивность не является постоянной величиной.

Взаимоиндукция. Если два проводника расположены поблизости один от другого и в одном из них протекает изменяющийся по величине ток, то в другом проводнике появится индуктированная э. д. с., носящая название э. д. с. взаимоиндукции.

Величина э. д. с. взаимоиндукции

$$e_2 = -M\frac{di_1}{dt} \text{ в},$$

где e_2 — э. д. с. взаимоиндукции во втором проводнике; $\frac{di_1}{dt}$ — скорость изменения тока в первом проводнике в $а$ в секунду; M — взаимоиндуктивность этих цепей в $гн$.

Взаимной индуктивностью в 1 $гн$ обладают две цепи в том случае, если в одной из них возникает э. д. с. в 1 $в$ при равномерном изменении тока в 1 $а$ в секунду в другой цепи.

Вихревые токи — это наведенные токи, которые возникают в металлических частях (деталях) электрических машин, аппаратов и приборов, пронизываемых изменяющимся магнитным потоком. Эти токи замыкаются в толще деталей. Вихревые токи являются причиной потерь энергии; для уменьшения этих потерь все стальные части, подвергающиеся переменным намагничиваниям, изготовляют из изолированных один от другого лаком или тонкой бумагой листов толщиной 0,35—1 $мм$. С той же целью применяют легированную сталь (с добавкой кремния), что увеличивает сопротивление ее и ведет к снижению потерь энергии на вихревые токи.

Формула для приближенного расчета потери мощности от вихревых токов

$$p_в = c\left(d\frac{f}{100}\cdot\frac{B_m}{10\,000}\right)^2 \text{ вт/кГ},$$

где f — число полных циклов перемагничивания в секунду; B_m — максимальная

магнитная индукция в *гс*; d — толщина листов в *мм*; c — коэффициент, зависящий от сорта стали; для электротехнической листовой стали $c \approx 22$; для легированной стали $c \approx 4{,}8$ (см. также табл. 4).

Энергия магнитного поля, отнесенная к 1 *см*³,

$$W_0 = \int_0^B H\,dB \quad дж/см^3.$$

Если магнитная проницаемость μ есть величина постоянная, то

$$W_0 = \frac{B^2}{2\mu} \quad дж/см^3.$$

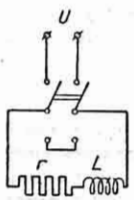
Выражение энергии магнитного поля через индуктивность:

$$W = \int_0^I Li\,di \quad дж.$$

Если индуктивность цепи постоянна и не зависит от протекающего по ней тока, то

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad дж.$$

Включение цепи, содержащей индуктивность и сопротивление (верхнее положение переключателя на фиг. 12)



Фиг. 12. Схема включения и короткого замыкания цепи, содержащей r и L.

$$i = I_y\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

где i — ток в a через t сек. после замыкания цепи; $I_y = \frac{U}{r}$ — установившийся ток в a; $\tau = \frac{L}{r}$ сек. — постоянная времени цепи, e — основание натуральных логарифмов.

Кривая изменения тока подобна кривой заряда конденсатора (см. фиг. 6).

Короткое замыкание цепи, содержащей индуктивность и сопротивление (нижнее положение переключателя на фиг. 12):

$$i = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Здесь I_0 — ток в цепи в момент ее короткого замыкания; значения остальных величин указаны выше.

Кривая изменения тока в закороченной цепи подобна кривой разряда конденсатора (см. фиг. 6).

Свойства ферромагнитных тел

Кривые намагничивания. Зависимость между магнитной индукцией B и напряженностью намагничивающего поля H для ферромагнитных материалов не имеет точного аналитического выражения; для каждого ферромагнитного материала эту зависимость изображают в виде кривой намагничивания $B = f(H)$, определяемой опытным путем. Магнитная проницаемость $\mu_r\mu_0 = \mu = \frac{B}{H}$ зависит от магнитного состояния вещества и в общем случае изменяется с изменением напряженности магнитного поля. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля впервые была установлена в 1871 г. русским физиком А. Г. Столетовым.

В табл. 4, 4а, 5 и 6 приведены характеристики магнитных свойств и удельные потери электротехнических листовых сталей по ГОСТ 802—54. В обозначении марок сталей первая цифра (1, 2, 3, 4) характеризует степень легирования кремнием: 1 — слаболегированная, 2 — среднелегированная, 3 — повышеннолегированная, 4 — высоколегированная. Вторые цифры (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) характеризуют электромагнитные свойства стали. Третья цифра (0) обозначает, что сталь холоднокатанная, текстурованная.

Индекс у B означает напряженность магнитного поля в ампер-витках на 1 *см* (*ав/см*). Индекс у P означает: числитель — максимальное значение индукции, выраженное в тысячах *гаусс* при синусоидальном изменении индукции; знаменатель — частоту перемагничиваний в *герцах*.

Таблица 4

Значения магнитной индукции и удельных потерь сталей марок Э34, Э340, Э44

Марка стали	Номинальная толщина листа в *мм*	Магнитная индукция в тыс. *гс* не менее			Удельные потери в *вт/кГ* не более	
		B_5	B_{10}	B_{25}	$P_{1,5/400}$	$P_{10/400}$
Э34	0,35	11,8	13	14,5	13,0	23,0
Э340	0,35	14,6	15,7	17	12,0	21,0
Э340	0,20	14	15,5	16,7	7,0	12,0
Э44	0,35	11,8	12,9	14,3	10,7	19,0
Э44	0,15	11,8	12,8	14,2	7,2	12,5
Э44	0,10	11,6	12,8	14,1	6,8	11,7

Таблица 4а

Значения магнитной индукции и удельных потерь сталей

Марка стали	Номинальная толщина листа в *мм*	Магнитная индукция в тыс. *гс* не менее					Удельные потери в *вт/кГ* не более		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
Э11	1,0	—	15	16,2	17,5	19,7	5,80	13,4	—
Э11	0,50	—	15	16,2	17,5	19,7	3,30	7,90	—
Э12	0,50	—	14,9	16,1	17,4	19,6	2,80	6,80	—
Э21	0,50	—	14,8	15,9	17,3	19,4	2,50	6,10	—
Э31	0,50	—	14,6	15,7	17	19	2,00	4,50	—
Э31	0,35	—	14,6	15,7	17	19	1,60	3,60	—
Э41	0,50	13	14,5	15,6	16,8	18,8	1,60	3,60	—
Э42	0,50	12,9	14,4	15,5	16,7	18,7	1,40	3,20	—
Э43	0,50	12,8	14,3	15,4	16,6	18,7	1,25	2,90	—
Э41	0,35	13	14,5	15,6	16,8	18,8	1,35	3,20	—
Э42	0,35	12,9	14,4	15,5	16,7	18,7	1,20	2,80	—
Э43	0,35	12,8	14,3	15,4	16,6	18,7	1,05	2,50	—
Э310	0,50	15,7	17	18	19	19,8	1,25	2,80	3,80
Э320	0,50	16,5	18	18,7	19,2	20	1,15	2,50	3,50
Э330	0,50	17	18,5	19	19,5	20	1,05	2,30	3,20
Э310	0,35	15,7	17	18	19	19,8	1,00	2,20	3,20
Э320	0,35	16,5	18	18,7	19,2	20	0,90	1,90	2,90
Э330	0,35	17	18,5	19	19,5	20	0,80	1,70	2,60

Таблица 5

Значения магнитной индукции сталей марок Э45 и Э46

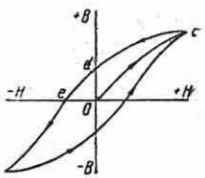
Марка стали	Толщина листа в *мм*	Магнитная индукция в *гс* не менее		
		$B_{0,002}$	$B_{0,004}$	$B_{0,008}$
Э45	0,35	1,20	2,60	7,7
Э46	0,35	1,50	3,30	8,8
Э45	0,20	1,30	2,80	7,0
Э46	0,20	1,60	3,50	8,8
Э45	0,15	1,30	2,80	7,0
Э46	0,15	1,60	3,50	8,8
Э45	0,10	1,30	2,80	6,0
Э46	0,10	1,70	3,50	8,0

Таблица 6

Значения магнитной индукции сталей марок Э370, Э47, Э48

Марка стали	Толщина листа в *мм*	Магнитная индукция в тыс. *гс* не менее						
		$B_{0,1}$	$B_{0,2}$	$B_{0,5}$	$B_{0,7}$	B_1	B_5	B_{10}
Э370	0,35	1,4	5	9	10,4	11,6	16	17
Э47	0,35	0,3	1	3,8	5,3	6,6	11,8	12,9
Э48	0,35	0,4	1,4	4,8	6,2	7,4	12	12,9
Э370	0,20	0,8	2	6,5	7,5	8	13,5	16
Э47	0,20	0,25	0,8	3,8	5,3	6,6	11,7	12,8
Э48	0,20	0,35	1,2	4,7	6	7,3	11,9	12,8
Э47	0,15	0,23	0,65	3,5	5,1	6,4	11,7	12,8
Э48	0,15	0,28	0,85	4,5	5,8	7	11,8	12,8
Э47	0,10	0,23	0,65	3,5	5,1	6,4	11,7	12,7
Э48	0,10	0,28	0,85	4,5	5,8	7	11,8	12,7

Гистерезис. При перемагничивании ферромагнитных тел величина магнитной индукции зависит не только от напряженности магнитного поля, но и от предшествующего магнитного состояния. Вид кривой цикла перемагничивания, называемой петлей гистерезиса, приведен на фиг. 13, *od* на фиг. 14 — остаточный магнетизм — магнитная индукция при $H = 0$; *oe* — коэрцитивная сила — напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания.



Фиг. 13.

Потери на гистерезис. Перемагничивание ферромагнитных тел связано с потерями энергии.

Мощность потерь на гистерезис подсчитывается по эмпирической формуле

$$p_г = \frac{f}{100}\left[a\frac{B_m}{10000} + b\left(\frac{B_m}{10000}\right)^2\right] вт/кГ,$$

где B_m — максимальное значение магнитной индукции в *гс*; f — число полных циклов перемагничивания в секунду; коэффициенты a и b находятся по табл 7.

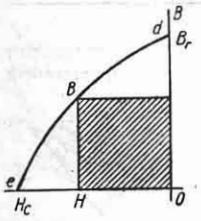
Полные потери (на гистерезис и вихревые токи) при перемагничивании ферромагнитных тел равны сумме потерь

Таблица 7

Сорт стали	Толщина листов в *мм*	*a*	*b*
Обыкновенная электротехническая листовая сталь	0,35 0,5 1,0	0,9 0,9 0,9	3,8 3,5 3,5
Легированная сталь (с добавкой 2—4% кремния)	0,35 0,5	0,3 0,4	2,1 2,6

на вихревые токи и гистерезис. Они могут быть определены либо приближенно по приведенным выше формулам, либо непосредственно по данным испытаний (табл. 4 и 4а).

Постоянные магниты характеризуются большими значениями остаточной магнитной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c.



Фиг. 14. Участок кривой размагничивания постоянного магнита.

На фиг. 14 в крупном масштабе приведен участок кривой размагничивания между точками *d* и *e*. Выпуклость кривой размагничивания (удельная магнитная энергия) характеризуется максимальным значением площади заштрихованного прямоугольника.

Сталь сортовая для постоянных магнитов по ГОСТ 6862-54 (табл. 8) выпускается квадратного (сторона квадрата в *мм* 10 и 20), круглого диаметром в *мм* 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 25; 28; (30); 32; (35); 36; 40; 45; (48); 50; 55; 60; (65); 70 и прямоугольного сечений в *мм* 6×18; 6×22; 6×25; 8×12; 8×16; 8×20; 8×25; 10×16; 10×18; 10×20; 10×40; 12×30; 12×35; 12×40; 12×48; 12×50; 14×35; 16×30; 16×40; 20×35; 20×40; 25×35.

Размеры в скобках применять не рекомендуется.

Таблица 8

Магнитные свойства стали по ГОСТ 6862-54

Марка	Напряженность намагничивающего поля в эрстедах	Остаточная индукция B_r в гауссах	Коэрцитивная сила H_c в эрстедах	Произведение $B_r \times H_c$ гауссы × эрстеды
		не ниже		
ЕХ	500	9 000	58	550 000
ЕХ3	500	9 500	60	600 000
Е7В6	500	10 000	62	650 000
ЕХ5К5	1000	8 500	100	900 000
ЕХ9К15М	1000	8 000	170	1 400 000

Помимо сортовой магнитной стали промышленность выпускает литые постоянные магниты в виде отливок или в окончательно обработанном виде по ГОСТ 4402-48.

Магнитные свойства их приведены в табл. 9.

Сталь для постоянных магнитов поступает к потребителю умягченной, и для придания ей необходимых свойств она должна быть подвергнута специальной термической обработке по инструкциям указанных выше стандартов.

Таблица 9

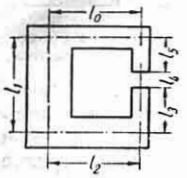
Магнитные свойства сплавов для постоянных магнитов

Марка		Характеристика величины магнитной энергии	Остаточная индукция B_r в *гс*	Коэрцитивная сила H_c в эрстедах	Удельная магнитная энергия $\frac{BH}{8\pi}$ макс. в *эрг/см³*
новая	старая				
АН1	Ални1	Нормальная	7 000	250	28 000
АН2	Ални2	Нормальная	6 000	430	38 000
АН3	Ални3	Нормальная	5 000	500	36 000
АНК	Алниси	Нормальная	4 000	750	43 000
АНКо1	Алнико12	Повышенная	6 800	500	55 000
АНКо2	Алнико15	Повышенная	7 500	600	60 000
АНКо3	Алнико18	Повышенная	9 000	650	97 000
АНКо4	Алнико24 или магнико	Высокая	12 300	500	150 000

Магнитные цепи

Магнитная цепь — совокупность тел, предназначенных для сосредоточения магнитного поля в определенной части пространства.

Закон магнитной цепи (вытекает из закона полного тока)



Фиг. 15.

$$Iw = \sum_{k=1}^{k=n} H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_5 l_5 + H_6 l_6$$

(фиг. 15).

Этот закон справедлив и для любого из участков магнитной цепи. Например, для участка *3*

$$(Iw)_3 = H_3 l_3 .$$

Закон Ома для магнитной цепи

$$\Phi = \frac{(Iw)_к}{\frac{l_к}{\mu_к S_к}},$$

где Ф — магнитный поток в *в·сек*; $(Iw)_к$ — намагничивающая сила в *а*; $\frac{l_к}{\mu_к S_к} = R_m$ — магнитное сопротивление данного участка магнитной цепи (имеет размерность $1/гн$ или $1/ом \cdot сек$).

Расчет магнитной цепи заключается в определении необходимых Iw для получения заданного потока Ф или магнитной индукции

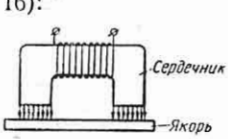
$$B_к = \frac{\Phi}{S_к}.$$

По кривой намагничивания (стр. 334) для заданного $B_к$ определяется $H_к$. Далее подсчитывается число необходимых ампервитков:

$$Iw_к = H_к l_к.$$

Подъемная сила электромагнита — сила, с которой якорь притягивается к сердечнику (фиг. 16):

$$F \approx 4 \left(\frac{B}{10000}\right)^2 S,$$



Фиг. 16.

где F — подъемная сила электромагнита в *кГ*; B — магнитная индукция в воздушном зазоре между якорем и сердечником в *гс*; S — суммарная площадь торцевых частей сердечника электромагнита в $см^2$.

При пользовании этой формулой следует учитывать, что:

а) с уменьшением воздушного зазора по мере притягивания якоря магнитная индукция возрастает и сила тяги электромагнита увеличивается;

б) формула дает общую силу тяги; для получения чистого тягового усилия электромагнита из значения силы, полученного по формуле, нужно вычесть вес якоря.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные законы

Сопротивление проводника

$$r = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S} \; ом,$$

где l — длина проводника в *м*; S — площадь поперечного сечения проводника в $мм^2$; ρ — удельное сопротивление материала проводника в $ом \cdot мм^2/м$ (см. табл. 10); $\gamma = \frac{1}{\rho}$ — удельная проводимость в $м/ом \cdot мм^2$.

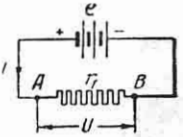
Зависимость сопротивления проводника от его температуры

$$r_t = r_0 [1 + \alpha (t - 20)°],$$

где r_0 — сопротивление проводника при 20° С; r_t — сопротивление проводника при $t°$ С; α — температурный коэффициент материала проводника (см. табл. 10).

Закон Ома (фиг. 17):

$$I = \frac{e}{r},$$



Фиг. 17. Схема к объяснению закона Ома.

где I — величина тока в цепи в *а*; e — э. д. с. источника тока в *в*; r — сопротивление всей цепи (внешнее и внутреннее) в *ом*. Закон справедлив и для любого из участков замкнутой цепи. Например, для участка AB

$$I = \frac{U}{r_1}; \quad U = Ir_1;$$

r_1 — сопротивление участка AB в *ом* Ir_1 — падение напряжения на участке AB

Закон Ленца-Джоуля

$$Q = 0{,}24I^2rt$$

(при неизменяющемся токе),

$$Q = 0{,}24r\int i^2dt$$

(при изменяющемся токе),
где Q — количество тепла в малых калориях, выделившееся в проводнике сопротивлением r *ом* за t сек.; I, i — ток в проводнике в *а*.

Работа электрического тока

$$A = UIt = I^2r_1t$$

(при неизменяющихся токе и напряжении);

$$A = \int_0^t uidt = r_1\int_0^t i^2dt$$

(при изменяющихся токе и напряжении), где A — работа электрического тока в *дж* при протекании его по сопротивлению r_1 *ом* в течение t сек.; I, i — величина тока в *а*; U, u — напряжение на зажимах сопротивления в *в*.

Мощность электрического тока

$$P = UI = I^2r_1$$

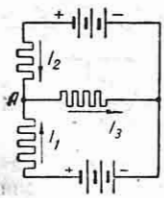
(при неизменяющихся токе и напряжении);

$$p = \frac{dA}{dt} = ui = i^2r_1$$

(при изменяющихся токе и напряжении), где P, p — мощность в *вт*, затрачиваемая в сопротивлении r_1 *ом*; u, i — мгновенные значения соответственно напряжения в *в* на зажимах сопротивления и величины протекающего по нему тока в *а*.

Цепи постоянного тока

Постоянным называется электрический ток, который в течение достаточно длительного промежутка времени не изменяет своего направления.



Фиг. 18. Схема к объяснению первого закона Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа (фиг. 18). Сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла:

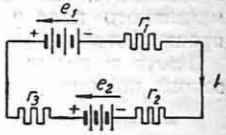
$$\sum I_n = 0.$$

Например, для узла A

$$I_1 + I_2 = I_3.$$

Второй закон Кирхгофа (фиг. 19) Для любого замкнутого контура электрической цепи алгебраическая сумма всех э. д. с. данного контура равна алгебраической сумме падений напряжений во всех сопротивлениях, входящих в этот контур:

$$\sum e_n = \sum Ir_n.$$



Фиг. 19. Схема к объяснению второго закона Кирхгофа.

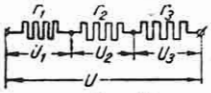
Э. д. с. и токи считаются положительными, если их направление совпадает с произвольно принятым направлением обхода цепи. Например, при обходе цепи (фиг. 20) по часовой стрелке

$$-e_1 + e_2 = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3.$$

Последовательное соединение приемников энергии (сопротивлений) (фиг. 20)

$$r_э = \sum r_n = r_1 + r_2 + r_3;$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3;$$



Фиг. 20.

$$U_1 : U_2 : U_3 = r_1 : r_2 : r_3,$$

где $r_э$ — эквивалентное сопротивление.

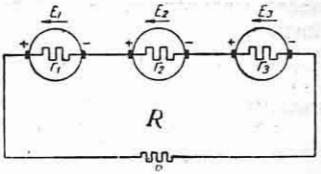
Последовательное соединение источников энергии (фиг. 21)

$$E = \sum E_n = E_1 + E_2 + E_3;$$

$$r_в = \sum r_n = r_1 + r_2 + r_3;$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3,$$

где E_1, E_2 и E_3 — э. д. с. источников энергии; r_1, r_2 и r_3 — внутренние сопротивления источников энергии; E — результирующая э. д. с. всех последовательно соединенных источников энергии; $r_э$ — эквивалентное внутреннее сопротивление.



Фиг. 21.

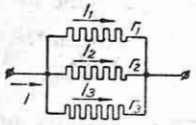
Если цепь с внешним сопротивлением R питается несколькими последовательно соединенными источниками энергии

(фиг. 21), величина тока определяется по формуле

$$I = \frac{E_1 + E_2 + \ldots}{r_1 + r_2 + \ldots + R} = \frac{\sum E_n}{R + \sum r_n},$$

где r — обозначение внутренних сопротивлений источников энергии; E — общее обозначение их э. д. с. При этом э. д. с. одного направления следует считать положительными, а э. д. с. обратного направления (если таковые имеются) отрицательными. Последовательно соединяются только источники энергии, рассчитанные на одинаковый ток.

Параллельное соединение приемников энергии (фиг. 22)



Фиг. 22.

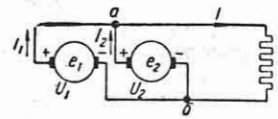
$$\frac{1}{r_э} = \sum \frac{1}{r_n} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3};$$

$$y_э = y_1 + y_2 + y_3;$$

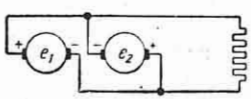
$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

где $r_э$ — эквивалентное сопротивление всего разветвления; $y = \frac{1}{r}$ — проводимость.

Параллельное соединение источников энергии (фиг. 23). При параллельном соединении источников энергии



Фиг. 23.



Фиг. 24.

(фиг. 23) все их положительные зажимы соединяются в одну общую точку, а все отрицательные — в другую:

$$I = \sum I_n = I_1 + I_2;$$

$$U_{аб} = U_1 = U_2.$$

Соединение, показанное на фиг. 24, не является параллельным.

ПЕРЕМЕННЫЕ ТОКИ

Основные определения и термины

Переменным называется ток (или напряжение), периодически изменяющий свою величину и направление.

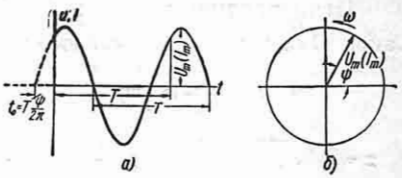
Синусоидальным (фиг. 25) называется переменный ток, изменение которого во времени протекает по закону синуса:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

или

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Кривая на фиг. 25, *а* представляет изменение проекции радиуса-вектора на вертикальную ось окружности (фиг. 25, *б*)



Фиг. 25. График синусоидального переменного тока.

при равномерном вращении его с угловой скоростью ω.

В электротехнике находят преимущественное применение синусоидальные переменные токи.

Угол φ сдвига фаз двух синусоидальных величин — угол между их радиусами-векторами (или просто векторами) для любого момента времени.

Векторная диаграмма изображает синусоидальные величины при помощи их векторов, фиксируя относительное положение векторов с учетом углов сдвига фаз между ними.

Период T — время в секундах полного изменения синусоидальной величины (фиг. 25, *а*).

Частота — число периодов в секунду:

$$f = \frac{1}{T} \text{ гц или пер/сек.}$$

Угловая частота

$$\omega = 2\pi f \text{ сек}^{-1}.$$

Среднее (за полпериода) значение переменного тока (или напряжения)

$$I_{ср} = \frac{2}{\pi} I_m = 0{,}637 I_m;$$

$$U_{ср} = 0{,}637 U_m.$$

Эффективное, или действующее, значение синусоидального переменного тока численно равно такому постоянному току, который за промежуток времени, равный одному периоду, выделяет в сопротивлении такое же количество тепла, как и переменный ток:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_m.$$

Эффективное, или действующее, значение синусоидального напряжения (э. д. с.)

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Цепи переменного тока

Закон Ома для цепи переменного тока

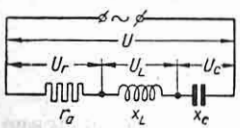
$$I = \frac{U}{z}\, a,$$

где $z = \sqrt{r_a^2 + (x_L - x_C)^2}$ — полное или кажущееся сопротивление всей цепи; r_a — активное сопротивление; $x_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление; $x_C = \frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление.

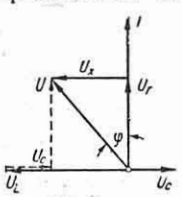
В этих формулах выражены: z, x_L, x_C и r_a — в *ом*; L — в *гн*; C — в *ф*; ω — в радианах в секунду.

Активное сопротивление r_a цепи переменного тока больше омического сопротивления той же цепи при протекании по ней постоянного тока, причиной чего являются вытеснение тока и потери в стали (если цепь содержит сталь). Для цепей, не содержащих стали, при промышленных частотах активное сопротивление r_a можно принимать равным омическому r.

Векторная диаграмма напряжений для цепи по фиг. 26 представлена на фиг. 27. Напряжение на активном сопротивлении U_r совпадает по фазе с током I; напряжение на индуктивном сопротивлении U_L опережает ток на 90°; напряжение на емкостном сопротивлении U_C отстает от тока на 90°. Суммарное реактивное напряжение U_x складывается геометрически с U_r и дает в результате напряжение на зажимах U.



Фиг. 26. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.



Фиг. 27. Векторная диаграмма к схеме фиг. 25.

Резонанс напряжений в неразветвленной цепи переменного тока наступает при $x_L = x_C$. Тогда

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{r_a}.$$

Такая цепь проявляет себя как цепь, содержащая только активное сопротивление.

При неизменных L и C резонанс напряжений наступает при $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, т. е. при частоте

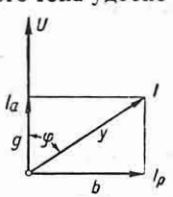
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Если при резонансе напряжений x_L и x_C значительно превышают r_a, напряжения U_L и U_C будут много больше приложенного напряжения U, что может оказаться опасным для изоляции цепи, а особенно для конденсатора.

Проводимости. При расчете разветвленных цепей переменного тока удобно оперировать проводимостями.

Кажущаяся, или полная, проводимость цепи (фиг. 28)

$$y = \frac{1}{z} = \sqrt{g^2 + b^2}.$$



Фиг. 28. Векторная диаграмма проводимостей.

Активная проводимость

$$g = y \cos\varphi.$$

Реактивная проводимость

$$b = y \sin\varphi.$$

Активная составляющая тока

$$I_a = Ug.$$

Реактивная составляющая тока

$$I_p = Ub.$$

Ток

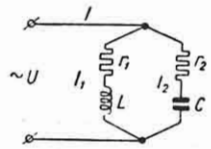
$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = Uy = U\sqrt{g^2 + b^2}.$$

Разветвленная цепь (фиг. 29). Ток I в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме токов ветвей (первый закон Кирхгофа):

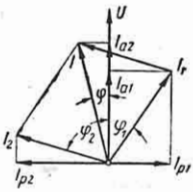
$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2.$$

Векторная диаграмма этой цепи дана на фиг. 30.

Для определения величины тока в неразветвленной части цепи нужно геометрически сложить активную и реактивную составляющие, т. е.



Фиг. 29. Схема разветвленной цепи.



Фиг. 30. Векторная диаграмма к схеме фиг. 29.

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2},$$

где

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = U(g_1 + g_2);$$

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = U(b_1 + b_2).$$

В цепи фиг. 29 I_{p2} и соответственно b_2 отрицательны.

Резонанс токов. Для разветвленной цепи, где одна ветвь содержит индуктивность L, другая — емкость C при равенстве абсолютных величин реактивных проводимостей, наступает резонанс токов, характеризующийся тем, что ток неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением. Для данных r_1 и r_2 при резонансе этот ток имеет минимальное значение.

Общее условие резонанса токов:

$$\frac{x_L}{r_1^2 + x_L^2} = \frac{x_C}{r_2^2 + x_C^2}.$$

При неизменных L и C резонанс токов наступает при условии

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \cdot \frac{r_1^2 C - L}{r_2^2 C - L}.$$

При $r_1 = r_2$ условие резонанса токов принимает вид

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

(то же, что и для резонанса напряжений).

При $r_1 = r_2 = 0$ ток $I = 0$. Источник энергии может быть отключен. В цепи будут иметь место колебания частотой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Из этого следует, что при резонансе токов величина тока в ответвлении может значительно превышать ток I в неразветвленной части цепи.

Мощность цепи переменного тока (*активная*)

$$P = UI\cos\varphi = I^2 r_a \ вт,$$

где φ — угол сдвига фаз между током и напряжением; $\cos\varphi$ называется коэффициентом мощности.

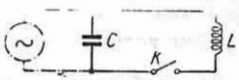
Мощность кажущаяся

$$S = UI \ ва.$$

Мощность реактивная в реактивных вольтамперах:

$$Q = UI\sin\varphi = S\sin\varphi = P\,\mathrm{tg}\,\varphi \ вар.$$

Колебательный контур — цепь, содержащая емкость и индуктивность, в которой могут иметь место колебания электрической энергии (фиг. 31). Если активное сопротивление цепи $r_a = 0$, и конденсатор C заряжен до напряжения U_{C_m}, то при замыкании ключа K в цепи возникнет незатухающий колебательный процесс:



Фиг. 31.

$$i = I_m \sin\omega_0 t;$$

$$u_C = U_{C_m} \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Собственная частота колебательного контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \ гц.$$

Собственная угловая частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_0 \text{ радиан/сек.}$$

Период собственных колебаний

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{LC} \text{ сек.}$$

Амплитудное (максимальное) значение тока в колебательном контуре

$$I_m = \frac{U_{C_m}}{\sqrt{\frac{L}{C}}}\, a,$$

где $\sqrt{\frac{L}{C}}$ — волновое сопротивление колебательного контура в *ом*.

Если активное сопротивление колебательного контура не равно нулю

$$0 < r_a < 2\sqrt{\frac{L}{C}},$$

колебания будут затухающими с частотой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r_a^2}{4L^2}}.$$

Если при этих условиях на зажимы колебательного контура подключить генератор переменного тока соответствующей частоты (на фиг. 31 показан пунктиром), потери в активном сопротивлении будут покрываться за счет этого генератора, и колебания будут незатухающими.

При величине активного сопротивления колебательного контура $r_a > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ в контуре будет иметь место апериодический разряд конденсатора.

Колебательный контур имеет широкое применение в технике (индукционные печи, закалка т. в. ч. и т. д.). Однако наиболее важным и значительным его применением бесспорно надо считать радиотехнику.

Трехфазные цепи

Трехфазной цепью называется совокупность трех отдельных электрических цепей, имеющих одинаковую частоту и э. д. с., сдвинутые по фазе.

Трехфазная система называется симметричной, если амплитуды э. д. с. отдельных цепей равны между собой и сдвинуты по фазе на угол $\frac{2\pi}{3}$.

В электротехнике находят преимущественное применение симметричные трехфазные системы. На фиг. 32 представлены векторная диаграмма и график изменения э. д. с. трехфазной системы.

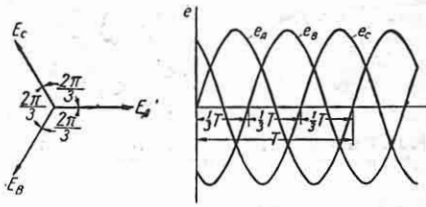
Э. д. с. отдельных фаз выражаются уравнениями

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right);$$

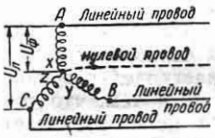
$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

В любой момент сумма токов (э. д. с.) трехфазной системы равна нулю.

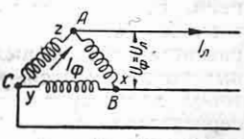


Фиг. 32. Диаграмма трехфазного тока.

Соединение обмоток трехфазных источников энергии (генераторов, трансформаторов) производится либо звездой (фиг. 33), либо треугольником (фиг. 34). При соединении звездой все начала (или все концы) фазных обмоток соединяются в общую нулевую точку. Нагрузка подключается к свободным концам фазных



Фиг. 33. Соединение источников трехфазного тока звездой.



Фиг. 34. Соединение источников трехфазного тока треугольником.

обмоток. При соединении треугольником все три фазные обмотки соединяются последовательно. Нагрузка подключается к точкам соединения фазных обмоток.

Фазным называется напряжение $U_ф$, создаваемое одной фазной обмоткой.

Линейным называется напряжение $U_л$, измеренное между двумя линейными проводами.

Соотношения между линейными и фазным напряжениями и токами.

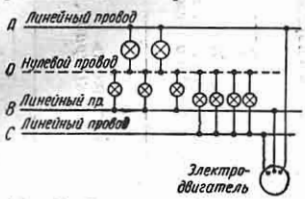
Соединение звездой:

$$U_л = \sqrt{3}U_ф;\quad I_л = I_ф.$$

Соединение треугольником:

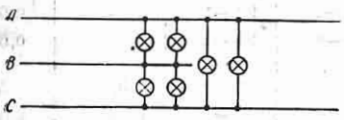
$$U_л = U_ф;\quad I_л = \sqrt{3}\, I_ф.$$

Соединение приемников энергии в трехфазных цепях производится также



Фиг. 35. Соединение приемников при трехфазном токе звездой.

либо звездой (фиг. 35), либо треугольником (фиг. 36). Соотношения между линейными напряжениями и токами — такие же, как и для обмоток трехфазных источников энергии.



Фиг. 36. Соединение приемников при трехфазном токе треугольником.

Трехфазная система с нулевым проводом (на фиг. 33 и 35 нулевой провод показан пунктиром) применяется при соединении в звезду приемников и обмоток трехфазного источника энергии. Такая система применяется для питания приемников двух напряжений, различающихся в $\sqrt{3}$ раз, например, ламп, включаемых на фазное напряжение, и двигателей, включаемых на линейное напряжение.

Мощность трехфазной системы при равномерной нагрузке фаз независимо от способа соединения (звезда или треугольник) выражается формулой

$$P = \sqrt{3} U_л I_л \cos\varphi \ вт,$$

где φ — угол сдвига фаз между фазным напряжением и фазным током.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Проводниковые и изоляционные материалы

В табл. 10 и 11 приведены основные свойства проводниковых и изоляционных электротехнических материалов.

Таблица 10

Свойства проводниковых материалов

Материал	Удельный вес в $кГ/дм^3$	Температура плавления в °С	Удельное сопротивление при 20° С в $ом \cdot мм^2/м$	Температурный коэффициент сопротивления α	Средняя теплоемкость c_m в $ккал/кГ \cdot град$	Теплопроводность λ в $ккал/м \cdot час \cdot град$
Алюминий	2,7	659	0,029	0,0039	0,22	175
Бронза	8,8—8,9	900	0,021—0,04	0,004	0,1	55
Вольфрам	18,7—19,1	3370	0,05	0,0046	—	125
Железо	7,85	1530	0,1—0,15	0,0063	0,12	50—60
Кадмий	8,6	321	0,076	0,004	0,06	8
Константан	8,85	1200	0,4—0,51	0,00005	0,10	20
Латунь	8,4—8,7	960	0,07	0,002	0,09	75—100
Медь	8,9	1083	0,0175	0,004	0,09	330
Манганин	8,14	910	0,4—0,48	0,000015	0,1	20
Никель	8,8	1450	0,09—0,12	0,0064	0,11	50
Никелин	8,92	1060	0,4—0,44	0,0003	0,11	50
Нихром	8,2	1375	1,1	0,0003	—	—
Олово	7,3	232	0,12	0,0044	0,56	54
Платина	21,4	1770	0,1—0,11	0,0025	0,03	60
Ртуть	13,6	—38,9	0,942	0,00096	0,03	6
Свинец	11,3	327	0,208	0,004	0,03	30
Серебро	10,5	961	0,016	0,0036	0,06	360
Сталь	7,85	1300—1400	0,1—0,2	0,005	0,12	22—45
Фехраль	7,6	1450	1,2—1,4	0,0002	—	—
Цинк	7,1	419	0,06	0,0037	0,10	95
Чугун	7,2	1200	0,52	0,001	—	40

Таблица 11

Свойства изоляционных материалов

Материал	Удельный вес в *Г/см³* или в *кГ/дм³*	Относительная диэлектрическая проницаемость* $\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$	Электрическая прочность в *кв/мм*	Удельное объемное сопротивление при 20° С в *ом·см*	Теплоемкость в *вт·сек/Град*	Теплопроводность в *вт/см·град*
Асбест	1,2—2,5	—	1,5—3,0	$2 \cdot 10^5$	0,82	0,0018
Асфальт	1,1—1,3	2,7	13—16	10^{14}	0,22	0,006
Бакелит (гетинакс) цилиндрический	1,2—1,3	3,8—5	10—15	10^{11}—10^{15}	0,3—0,4	0,0017
Бакелит (гетинакс) листовой	1,3—1,4	4,5—6	10—20	10^{11}—10^{14}	0,3—0,4	0,0017
Бумага кабельная сухая	0,8	2,3—3,5	6—9	10^{15}—10^{16}	—	0,0013
Бумага кабельная, пропитанная маслом	—	3,4—3,7	10—25	10^{15}	0,75	0,0022
Воздух	0,00121	1,0	3—4	—	—	0,006
Дерево:						
а) дуб	0,86	4,5—5	4—7	10^{12}	2,4	—
б) береза	0,64	2,0—3,0	3—5	10^{10}	—	0,0018
в) бук	0,73	3,0—3,5	5—6	10^{11}	2,34	0,0035
Карболит	1,1—1,2	3,0—5,0	10—12	10^{11}—10^{12}	0,46	0,0006
Лакированная ткань	1,1—1,35	3,5—5,0	32—45	10^{12}—10^{13}	—	0,0025
Масло трансформаторное	0,85—0,89	2,0—2,5	5—18	10^{12}—10^{13}	1,8—1,9	0,002
Миканит	2,2	4,6—6,0	15—20	10^{15}	—	0,001
Мрамор	2,7	8,0—10,0	2—5	10^7—10^8	0,89	0,03
Парафин	0,85—0,92	2,0—2,2	15—30	10^{15}	2,5—3	0,002
Пресшпан сухой	0,9—1,3	2,5—4,0	8—10	10^9—10^{13}	—	0,0017
Пряжа хлопчатобумажная сухая	—	—	3—5	—	—	0,0036
Резина листовая	1,3—1,8	2,6—3,5	10—15	10^{13}—10^{14}	—	0,01
Слюда	2,8—3,2	4,0—7,0	80—150	10^{14}	0,2—0,7	0,0036
Стекло	2,5—2,7	5,5—10	10—40	10^{11}—10^{15}	0,8—0,9	0,011
Фарфор	2,3—2,7	5,0—7,5	6—10	10^{14}—10^{15}	1,0—1,2	0,01
Фибра	1,2—1,4	3,0—5,0	4—11	10^{10}	—	0,011
Шифер	2,7—2,9	4,0—16,0	1,5—3	10^7—10^{10}	0,8	0,02
Эбонит	1,15—1,3	2,0—3,5	8—10	10^{17}	0,59	0,0018

* ε — диэлектрическая проницаемость данного материала в *ф/м*; ε_0 — диэлектрическая проницаемость пустоты $\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-14}$ *ф/см* $= 8{,}86 \cdot 10^{-12}$ *ф/м*.

Провода и кабели с резиновой и винилитовой изоляцией. Эти провода наиболее широко применяются для подвода электроэнергии к отдельным токоприемникам небольшой и средней мощности, а также для соединения отдельных аппаратов на щитах, пультах и панелях.

Данные по наиболее ходовым маркам проводов и кабелей с резиновой и винилитовой изоляцией приведены в табл. 12—14.

Таблица 12

Марки, характеристика и области применения проводов и кабелей

Марка	Характеристика	Область применения
	Силовые и контрольные кабели с медными жилами и резиновой изоляцией	
СРГ	Освинцованный, голый, на напряжение 500 и 3000 *в* переменного тока и до 6000 *в* постоянного тока	Неподвижная прокладка на скобах внутри и снаружи помещений по стенам, в тоннелях и блоках при отсутствии вероятности механических повреждений. Противостоит сырости и действию паров и газов, не разрушающих свинца
ВРГ	В винилитовой оболочке, голый, на напряжение до 500 *в*	То же, что СРГ. Применяется также для прокладки в стальных (газовых) трубах и металлических рукавах и для прокладки внутри станков без дополнительной защиты от масла и эмульсии
КРПТ	Одно- и многожильный, в общем резиновом шланге, переносный, тяжелый, очень гибкий, до 500 *в*	Для подвода питания к подвижным токоприемникам при возможных значительных воздействиях на кабель
КВРГ	Контрольный многожильный кабель в винилитовой оболочке, голый	То же, что ВРГ
	Провода с медными жилами и резиновой изоляцией	
ПР-500	Провод одножильный, в пропитанной противогнилостным составом оплетке, для сетей напряжением до 500 *в*	Для прокладки на роликах и изоляторах внутри и вне зданий, в стальных трубах, в установочных и резиновых трубках, а также в металлических рукавах. Применяется также для коммутации панелей и щитов
ПРГ-500	То же, что ПР-500, но гибкий (многопроволочный)	Для соединения подвижных частей электрических машин и аппаратов
ПРТО	То же, что ПР-500, но с усиленной оплеткой. Одно- и многожильный	Для прокладки в стальных трубах, в том числе в сырых, пожаро- и взрывоопасных помещениях и в помещениях с едкими парами и газами
ПРП	Провод панцырный	Для открытой неподвижной прокладки при возможных небольших механических воздействиях, с защитой в опасных местах кожухами. Крепление скобами
ПРШП	Провод панцырный, в резиновой шланговой оболочке	То же, что ПРП. Имеет защиту от умеренных механических воздействий
	Провода с медными жилами и винилитовой изоляцией	
ПВ	Провод одножильный	Для прокладки на станках при напряжении до 500 *в*
ПВГ	Провод одножильный гибкий	То же, что ПВ, но при необходимости в повышенной гибкости

Таблица 13

Конструктивные данные силовых кабелей и проводов с резиновой и винилитовой изоляцией

Номинальное сечение в мм²	СРГ-500				ВРГ-500						КРПТ						ПР-500		ПРГ-500	
	Число жил																			
	2		3		1		2		3		1		2		3		1		1	
	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес
1,0	5,0×8,1	255	9,2	371	7,1	64	7,1×10,2	104	10,7	153	—	—	—	—	—	—	3,7	25	3,9	27
1,5	5,3×8,7	284	9,8	412	7,4	72	7,4×10,8	119	11,3	176	—	—	—	—	—	—	4,0	31	4,2	33
2,5	5,7×9,5	327	10,7	480	7,8	86	7,8×11,6	147	12,2	223	8,5	97	13,5	215	14,0	258	4,4	42	4,7	46
4,0	6,1×10,3	383	11,5	556	8,2	106	8,2×12,4	187	13,1	287	9,0	116	14,5	268	16,5	355	4,8	58	5,2	63
6,0	6,6×11,3	450	12,6	659	8,7	129	8,7×13,4	233	14,1	359	10,0	142	17,0	366	18,0	443	5,3	78	5,8	87
10	16,5	870	17,6	1037	11,0	206	18,6	455	19,7	592	12,5	224	23,0	691	24,5	844	7,6	140	8,0	152
16	18,5	1080	19,7	1311	12,0	277	20,6	612	21,8	810	13,5	297	25,5	887	26,5	1082	8,9	211	9,7	223
25	21,9	1434	23,6	1867	13,7	394	24,0	875	26,5	1233	17	468	32,0	1421	33,5	1739	10,6	317	12,0	349
35	24,5	1832	26,1	2281	14,9	503	27,4	1171	29,1	1576	19	609	34,0	1700	36,0	2105	11,8	417	13,0	445
50	28,7	2473	30,9	3224	16,9	683	32,4	1652	34,4	2228	21	785	38,0	2166	41,0	2814	13,8	585	14,9	601
70	32,1	3155	34,3	3998	18,5	890	35,6	2123	38,8	2972	24	1076	43,5	2956	46,0	3695	15,4	787	17,3	823
95	36,8	4145	39,5	5416	20,7	1165	41,0	2840	43,6	3876	—	—	—	—	—	—	17,6	1048	19,9	1117

Продолжение табл. 13

Номинальное сечение в мм²	ПВ	ПВ1	ПРТО-500								ПРП-500						ПРШП-500					
	Число жил																					
	1	1	1		2		3		4		1		2		3		1		2		3	
	d	d	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес
1,0	3,4	3,6	3,8	26	7,5	70	8,2	94	9,0	118	5,7	59	9,0	118	9,5	157	—	—	—	—	—	—
1,5	3,7	3,9	4,1	32	8,3	87	8,6	114	9,7	150	6,0	65	9,6	149	10,1	178	7,8	102	11,4	209	11,9	243
2,5	4,6	4,9	4,5	43	9,1	114	9,7	157	10,7	200	6,5	79	10,2	182	11,2	225	8,3	117	12,4	250	13,0	297
4,0	5,2	5,5	4,9	59	9,9	155	10,5	209	11,6	267	7,0	112	11,6	231	12,3	292	8,8	138	13,4	301	14,1	367
6,0	5,6	6,0	5,4	79	10,9	202	11,6	274	12,8	355	7,6	136	12,8	287	13,6	370	9,4	179	14,6	369	15,4	459

Продолжение табл. 13

Номинальное сечение в мм²	ПВ	ПВГ	ПРТО-500								ПРП-500						ПРШП-500					
	Число жил																					
	1	1	1		2		3		4		1		2		3		1		2		3	
	d	d	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес
10	7,0	7,6	7,7	142	15,5	358	16,5	491	18,9	658	8,9	189	16,6	449	17,7	783	11,3	250	18,8	592	19,9	761
16	—	—	8,9	209	17,5	504	19,2	722	21,3	934	10,6	278	20,0	646	21,3	859	13,0	340	22,2	837	23,9	1072
25	—	—	10,7	322	21,6	779	23,1	1097	25,6	1424	12,9	416	24,6	954	26,3	1287	15,3	400	27,6	1265	29,3	1643
35	—	—	11,9	421	24,0	1024	25,7	1429	28,5	1866	13,9	513	26,6	1176	28,4	1626	16,7	611	29,6	1646	31,4	2015
50	—	—	13,8	585	27,8	1414	29,7	1982	33,1	2604	15,8	672	30,4	1566	32,5	2160	18,6	782	33,8	2054	35,9	2675
70	—	—	16,9	824	34,0	2003	36,4	2807	40,6	3663	18,2	908	35,2	2107	37,7	2910	21,0	1033	38,6	2713	41,1	3563
95	—	—	20,5	1137	40,2	2684	43,1	3771	48,0	4941	20,3	1207	39,4	2768	42,2	3868	23,5	1341	42,8	3496	45,6	4639

Примечания: 1. *d* — наружный диаметр кабеля или провода в *мм*.
2. В графе „Вес" указан вес кабеля или провода в *кГ/км*.
3. Трехжильные кабели СРГ-500, ВРГ-500, провода ПРТО-500, двух- и трехжильные кабели КРПТ, провода ПРП-500 и ПРШП-500 изготовляются также с дополнительной заземляющей жилой.
4. Провода ПРП и ПРШП изготовляются также многожильными с числом жил 4 и более.

Конструктивные данные контрольного кабеля КВРГ-500 и многожильного провода ПРТО-500 *Таблица 14*

Число жил	КВРГ-500												ПРТО-500 многожильные											
	Сечение жилы в мм²												Сечение жилы в мм²											
	1,0		1,5		2,5		4		6		10		1,0		1,5		2,5		4,0		6,0		10	
	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес	d	Вес
4	11,6	181	12,1	209	13,1	267	14,8	346	16,0	440	21,5	746	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	12,5	217	13,1	248	14,2	318	—	—	—	—	—	—	9,9	144	10,7	176	11,8	234	—	—	—	—	—	—
6	13,4	244	14,1	287	15,3	369	17,3	475	18,8	611	26,6	1100	10,8	168	11,7	204	12,9	276	14,1	378	15,6	513	23,0	943
7	13,4	260	14,1	308	15,3	398	17,3	519	18,8	674	26,6	1208	10,8	185	11,7	227	12,9	307	14,1	417	15,6	580	23,0	1063
8	14,3	293	15,1	348	16,4	452	18,6	595	20,2	770	28,7	1387	11,7	212	12,7	262	14,0	355	15,4	497	17,0	668	25,1	1224
10	16,5	369	17,5	445	19,0	577	21,6	762	23,5	989	34,6	1864	13,9	256	15,1	316	16,7	437	18,8	630	20,8	842	30,0	1503
14	17,8	457	18,9	552	20,6	726	—	—	—	—	—	—	15,2	345	16,5	435	18,7	617	—	—	—	—	—	—
19	19,7	582	20,9	702	22,8	933	—	—	—	—	—	—	17,0	463	19,0	599	21,0	816	—	—	—	—	—	—
24	22,8	723	25,2	934	27,6	1234	—	—	—	—	—	—	20,6	601	22,4	758	24,8	1035	—	—	—	—	—	—
30	25,1	920	26,6	1099	29,1	1476	—	—	—	—	—	—	21,9	748	23,8	927	26,4	1271	—	—	—	—	—	—
37	26,9	1084	28,6	1316	32,3	1828	—	—	—	—	—	—	23,7	904	25,8	1125	28,6	1553	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. *d* — наружный диаметр кабеля или провода в *мм*.
2. В графе „Вес" указан вес кабеля или провода в *кГ/км*.

Обмоточные провода. Основные данные по наиболее ходовым маркам обмоточных проводов приведены в табл. 15—20.

Удельное сопротивление обмоточной меди принимается равным 0,01724 *ом·мм²/м* при 20° С. Температурный коэффициент

Таблица 15

Характеристика обмоточных проводов

Марка	Характеристика	Назначение
ПБО	Провод, изолированный одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи, круглого и прямоугольного сечения	Для обмоток электрических машин, трансформаторов и катушек электромагнитных аппаратов. Допустимая температура нагрева 90° С. При пропитке катушек допустимая температура повышается до 105° С
ПБД	Провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи, круглого и прямоугольного сечения	
ПЭЛБО	Провод круглого сечения, изолированный слоем эмали и слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи	То же, что ПБО и ПБД. Обладает хорошей механической прочностью изоляции и небольшими габаритами
ПЭЛШО	Провод круглого сечения, изолированный слоем эмали и слоем обмотки из шелка	Для обмоток малогабаритных электрических машин, аппаратов, приборов. Вследствие малой толщины изоляции габариты катушек получаются небольшими. Допустимая температура нагрева 90° С, при пропитке 105° С
ПЭЛШД	Провод круглого сечения, изолированный слоем эмали и двумя слоями обмотки из шелка	
ПДА	Провод с дельта-асбестовой изоляцией, круглого и прямоугольного сечения	Допустимая температура нагрева 130° С. Применяются для малогабаритных двигателей, сухих трансформаторов, электромагнитов и т. д.
ПСД	Провод с изоляцией из двух слоев стеклянного волокна, круглого или прямоугольного сечения	
ПЭЛ-1	Провод эмалированный, лакостойкий, повышенного качества, круглого сечения	Наибольшая допустимая температура нагрева 100° С. Применяются для катушек электромагнитов, приборов и других аппаратов и для мелких электрических машин
ПЭЛ-2	Провод эмалированный, лакостойкий, круглого сечения	
ПЭТ	Провод эмалированный, термостойкий, круглого сечения	Допустимая температура нагрева 125° С. Назначение то же, что ПЭЛ
ПЭВ-1	Провод эмалированный, круглого сечения, высокопрочный, однослойный	Для больших механических и электрических нагрузок следует пользоваться проводами ПЭВ-2 и ПЭВ-3. Допустимая температура 125° С
ПЭВ-2	То же двуслойный	
ПЭВ-3	То же трехслойный	

Таблица 16

Стандартные диаметры круглых обмоточных проводов (по меди) в *мм*

0,05	0,15	0,29	0,53	0,77	1,12	1,62	2,63
0,06	0,16	0,31	0,55	0,80	1,16	1,68	2,83
0,07	0,17	0,33	0,57	0,83	1,20	1,74	3,05
0,08	0,18	0,35	0,59	0,86	1,25	1,81	3,28
0,09	0,19	0,38	0,62	0,90	1,30	1,88	3,53
0,10	0,20	0,41	0,64	0,93	1,35	1,95	3,80
0,11	0,21	0,44	0,67	0,96	1,40	2,02	4,10
0,12	0,23	0,47	0,69	1,0	1,45	2,10	4,50
0,13	0,25	0,49	0,72	1,04	1,50	2,26	4,8
0,14	0,27	0,51	0,74	1,08	1,56	2,44	5,2

сопротивления при температуре t° принимается равным $\alpha = \frac{1}{234{,}5 + t}$. При нормальном естественном охлаждении для катушек электромагнитных аппаратов переменного тока допускают рабочие плотности тока от 1 до 2,5 *а/мм²*; для катушек электромагнитных аппаратов постоянного тока рабочие плотности тока назначаются в пределах от 2,5 до 4 *а/мм²*. Меньшие значения плотности относятся к большим катушкам, бóльшие плотности — к малым катушкам. Эти плотности указаны для проводов с хлопчатобумажной изоляцией. Для проводов с теплостойкими изоляциями рабочие плотности тока могут быть повышены на 10—15%. В условиях хорошего искусственного охлаждения рабочие плотности тока повышаются в 1,5—1,75 раза.

Таблица 17

Размеры круглых обмоточных проводов разных марок * в *мм*

Марка провода		ПБО	ПБД	ПЭЛБО	ПЭЛШО ПЭЛШД	ПДА
Изготовляется диаметром в *мм*	от	0,38	0,38	0,38	0,05	1,0
	до	2,10	5,20	1,56	1,45	4,80

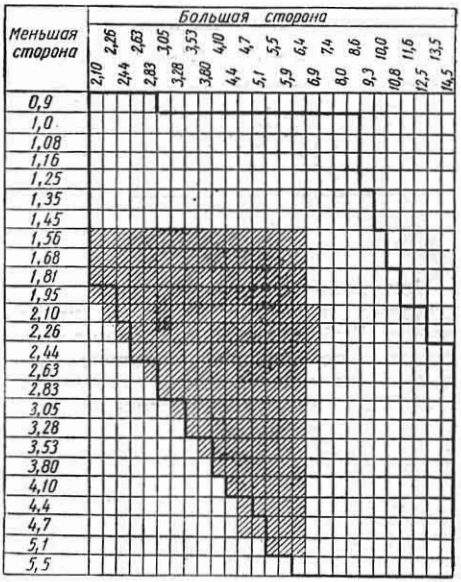
Марка провода		ПСД	ПЭЛ. ПЭТ	ПЭВ-1, 2, 3 **
Изготовляется диаметром в *мм*	от	1,0	0,05	0,11
	до	5,20	1,56	1,81

* Стандартные диаметры проводов см. табл. 16.

** Для проводов марок ПЭВ отсутствуют диаметры 0,21; 0,29; 0,53; 0,67; 0,72; 0,83; 0,90; 0,96; 1,04; 1,35; 1,45; 1,56; 1,62; 1,74 *мм*.

Таблица 18

Размеры прямоугольных обмоточных проводов марок ПБО, ПБД, ПДА и ПСД в *мм*



Провода ПБО, ПБД, ПСД изготовляются размерами, заключенными внутри жирного контура; провода марки ПДА изготовляются размерами, заключенными внутри заштрихованной зоны.

Таблица 19

Толщина изоляции в *мм* круглых обмоточных проводов

Диаметр провода в *мм*	Марка провода							
	ПБО	ПБД	ПЭЛБО	ПЭЛШО	ПДА	ПСД	ПЭЛ, ПЭТ	ПЭВ
0,05—0,09	—	—	—	0,035	—	—	0,0075	Толщина изоляции ПЭВ-1 примерно равна толщине изоляции ПЭЛ. Толщина изоляции ПЭВ-2 примерно в 1,5 раза, а ПЭВ-3 — в 2 раза больше толщины изоляции проводов марки ПЭЛ
0,1 —0,19	—	—	—	0,0375	—	—	0,01	
0,2 —0,25	—	—	—	0,045	—	—	0,0125	
0,27—0,29	—	—	—	0,05	—	—	0,0175	
0,31—0,38	0,06	0,11	0,08	0,0525	—	—	0,02	
0,41—0,49	0,06	0,11	0,0825	0,055	—	—	0,0225	
0,51—0,69	0,06	0,11	0,085	0,0575	—	—	0,025	
0,72—0,96	0,06	0,11	0,09	0,0625	—	—	0,03	
1,0 —1,45	0,07	0,135	0,105	0,0675	0,15	0,15	см.	
1,5 —2,1	0,07	0,135	0,105	—	0,15	0,15	приме-	
2,26—5,2	—	0,165	—	—	0,175	0,175	чание	

Примечание. Для проводов ПЭЛ и ПЭТ диаметром от 1,0 до 1,16 *мм* толщина изоляции равна 0,035 *мм*, для проводов диаметром от 1,2 до 1,56 *мм* толщина изоляции равна 0,04 *мм*.

Таблица 20

Толщина изоляции в *мм* прямоугольных обмоточных проводов

Марка провода	Меньшая сторона в *мм*		
	0,9—1,95	2,1—3,8	4,1—5,5
ПБО	0,07	0,0875	0,115
ПБД	0,135	0,165	0,22
ПДА, ПСД	Для всех размеров толщина изоляции равна 0,2 *мм*		

ПРОВОДКИ

Номинальный ток и напряжение силовых и термических токоприемников. Выбор сечения проводов для силовых и термических токоприемников производится по их номинальному току.

а) Электродвигатели постоянного тока:

$$I_н = 1000\frac{P_н}{U_н\eta_н} = kP_н\ a,$$

где $P_н$ — мощность двигателя в *квт* (на валу); $U_н$ — номинальное напряжение сети в *в*; $\eta_н$ — номинальный к. п. д. двигателя.

б) Однофазные двигатели переменного тока:

$$I_н = 1000\frac{P_н}{U_н\eta_н\cos\varphi_н}\ a.$$

в) Трехфазные двигатели переменного тока:

$$I_н = 1000\frac{P_н}{\sqrt{3}U_н\eta_н\cos\varphi_н} = kP_н\ a,$$

где $I_н$ и $U_н$ — линейные ток и напряжение; k — удельное потребление тока на 1 *квт* номинальной мощности двигателя. При нагрузках, отличных от номинальной, коэффициент k обычно увеличивается вследствие уменьшения η и $\cos\varphi$. В табл. 21 даны приближенные значения k в *а/квт*.

г) Для термических токоприемников трехфазного тока номинальный ток

$$I_н = 1000\frac{P_н}{\sqrt{3}U_н\cos\varphi_н}\ a.$$

Для однофазных термических токоприемников

$$I_н = 1000\frac{P_н}{U_н\cos\varphi_н}\ a.$$

Для печей сопротивления $\cos\varphi_н$ можно принимать равным единице.

Напряжение низковольтных сетей промышленных предприятий. Для сетей низкого напряжения постоянного тока наиболее распространено напряжение 220 *в*, однако иногда применяется 440 и 500 *в*. Для сетей трехфазного переменного тока почти исключительное распространение получило напряжение 220/380 *в*.

Допустимые нагрузки проводов, кабелей, шин, троллеев

Эти данные приведены в табл. 22, 24 и 25. Допустимые нагрузки для проводов определены исходя из температуры окружающего воздуха 25° С. Предельно допустимая температура проводов и кабелей принята равной 55° С. Если температура окружающего воздуха в месте прокладки проводов или кабелей превышает 25° С, допустимые нагрузки их исчисляются с учетом коэффициентов, указанных в табл. 23.

В табл. 22, где приведены две величины допустимых нагрузок, в скобках даны нагрузки, допустимые по условиям нагрева проводов током, но не рекомендуемые вследствие чрезмерных потерь энергии в проводах. Вне скобок

Таблица 21

Приближенные значения k в *а/квт* для определения номинального тока электродвигателей

Род тока и мощность двигателей	Номинальное напряжение в *в*						
	110	220	380	440	500	3000	6000
Постоянный ток для всех мощностей . . .	10	5	—	2,5	2,2	—	—
Трехфазный ток:							
до 2 *квт*	—	4	2,5	—	—	—	—
св. 2 *квт*	—	3,5	2	—	—	—	—
для всех мощностей	—	—	—	—	—	0,25	0,12

Таблица 22

Наибольшие длительно допустимые нагрузки и предельно допустимые величины номинальных токов плавких вставок для проводов и кабелей с медными жилами и резиновой изоляцией

Сечение жилы в *мм²*	При открытой прокладке проводов на опорах		При прокладке проводов в одной трубе					
			Наибольшая длительно допустимая нагрузка в *а*					
	А *	*Б* *	двух одножильных проводов	трех одножильных проводов	четырех одножильных проводов	одного двужильного провода	одного трехжильного провода	*Б* *
1,0	6 (15)	10 (20)	6 (14)	6 (13)	6 (12)	6 (13)	6 (12)	20 (35)
1,5	10 (20)	15 (25)	10 (17)	10 (15)	10 (14)	10 (16)	10 (13)	25 (60)
2,5	15 (27)	20 (35)	15 (24)	15 (22)	15 (22)	15 (22)	15 (19)	35 (80)
4	25 (36)	35 (60)	25 (34)	25 (31)	25 (27)	25 (28)	25	80 (100)
6	35 (46)	60	35 (41)	35 (37)	35	35	30	100 (125)
10	60 (68)	80	60	55	45	50	45	160
16	90	125	75	70	65	70	60	225
25	125	160	100	90	80	90	75	300
35	150	200	120	110	100	110	90	350
50	190	225	165	150	135	140	120	430
70	240	300	200	185	165	175	155	600
95	290	350	245	225	200	215	190	700

Сечение жилы в *мм²*	Для кабелей СРГ и ВРГ					
	одножильного		двужильного		трехжильного	
	А *	*Б* *	*А* *	*Б* *	*А* *	*Б* *
1,5	10 (20)	25 (60)	10 (17)	25 (60)	10 (15)	25 (60)
2,5	15 (27)	35 (80)	15 (24)	35 (80)	15 (22)	35 (80)
4	25 (36)	80 (100)	25 (34)	80 (100)	25 (31)	80 (100)
6	35 (46)	100 (125)	35 (41)	100 (125)	35 (37)	100 (125)
10	60 (68)	160 (200)	60	160	55	160
16	90	260	75	225	70	225
25	125	350	100	300	90	300
35	150	430	120	350	110	350
50	190	600	165	430	150	430
70	240	850	200	600	185	600
95	290	—	—	—	—	—

Примечание. Если защита ответвления производится автоматами без выдержки времени, уставки тока срабатывания этих автоматов могут превышать величины токов, указанные в графах *Б*, но не более чем на 50%.

* В графе *А* указаны наибольшие длительно допустимые нагрузки в амперах, в графе *Б* — предельно допустимые величины номинального тока плавких вставок предохранителей в амперах для ответвлений к силовым токоприемникам.

приведены нагрузки, рекомендуемые для широкого пользования.

Для повторно-кратковременного режима работы с общей продолжительностью цикла до 10 мин. и продолжительностью рабочего периода не более 4 мин. наибольшие допустимые нагрузки проводов и кабелей при сечениях до 6 *мм²* включительно определяются, как для установок длительного режима, по табл. 22; при сечениях от 10 *мм²* и выше — путем умножения величин, указанных в табл. 22, на коэффициент $\frac{0{,}875}{\sqrt{\text{ПВ}}}$, где ПВ — относительная продолжительность рабочего периода (включения).

Таблица 23

Поправочные коэффициенты к таблице длительно допустимых нагрузок проводов и кабелей с резиновой изоляцией

Значения поправочного коэффициента при температуре воздуха					
25° С	30° С	35° С	40° С	45° С	50° С
1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41

Таблица 24

Длительно допустимые нагрузки в *а* для шин прямоугольного сечения, расположенных на ребро

Размер в *мм*	Медные	Алюминиевые	Стальные			
	Нагрузка		Размер в *мм*	Нагрузка	Размер в *мм*	Нагрузка
15×3	210	165	20×3	65/100	20×4	70/115
20×3	275	215	25×3	80/120	25×4	85/140
25×3	340	265	30×3	95/140	30×4	100/165
30×4	475	365/370	40×3	125/190	40×4	130/220
40×4	625	480	50×3	155/230	50×4	165/270
40×5	700/705	540/545	60×3	185/280	60×4	195/325
50×5	860/870	665/670	70×3	215/320	70×4	225/375
50×6	955/960	740/745	80×3	245/365	80×4	260/425
60×6	1125/1145	870/880	90×3	275/410	90×4	290/480
80×6	1480/1510	1150/1170	100×3	305/460	100×4	320/530
100×6	1810/1875	1425/1455	—	—	—	—

Таблица 25

Длительно допустимые нагрузки стальных троллеев

Круглая сталь		Трубы стальные			Уголки стальные		Швеллеры	
		Диаметр						
Диаметр в *мм*	Нагрузка в *а*	внутренний в дюймах	наружный в *мм*	Нагрузка переменного тока в *а*	Размер в *мм*	Нагрузка в *а*	Размер в *мм*	Нагрузка в *а*
6	36/50	1/2	21,35	118	25×25×3	180/220	50×37×4,5	370/735
8	45/75	3/4	26,75	145	30×30×4	185/305	80×43×5	485/1045
10	60/100	1	33,5	180	35×35×4	210/355	100×48×5,3	580/1275
12	70/135	1 1/2	48,0	255	40×40×4	250/410	140×52×6	810/1780
					40×40×5	265/455		
14	80/165	2	60,0	320	50×50×5	315/565	Рудничные рельсы	
16	95/200	2 1/2	75,5	390	50×50×6	330/610		
18	110/240	3	88,5	455	60×60×6	395/740	65×50×25	390
20	125/275				60×60×8	410/840	65×54×25	410
26	150/400				75×75×8	520/1085	80,5×66×32	510
30	170/495				75×75×10	540/1180	91×76×37	595
							90×80×40	710

Примечания к табл. 24 и 25:
1. В числителе указаны нагрузки при переменном токе, в знаменателе — при постоянном.
2. Нагрузки указаны для температуры воздуха 25° С и предельной температуры шин 70° С.
3. Для рудничных рельсов нагрузки даны при переменном токе.

Проводки в стальных трубах

Таблица 26

Выбор диаметра в дюймах газо-водопроводных труб для прокладки проводов ПР-500, ПРТО-500 и кабеля ВРГ одного сечения

Сечение в *мм²*		ПР-500 или ПРТО-500										
		Число проводов в трубе или число жил										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,5	*А*	1/2	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1
	Б	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1	1 1/4
2,5	*А*	1/2	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1	1
	Б	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1	1	1 1/4
4	*А*	1/2	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4
	Б	3/4	3/4	1	1	1	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4

Продолжение табл. 26

Сечение в мм²		ПР-500 или ПРТО-500										
		Число проводов в трубе или число жил										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	А	3/4	3/4	3/4	3/4	1	1	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4
	Б	3/4	3/4	1	1	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4
10	А	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2
	Б	1	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2
16	А	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2	2
	Б	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2	2
25	А	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
	Б	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
35	А	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
	Б	1 1/2	2	2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
50	А	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3
	Б	2	2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3
70	А	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3
	Б	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3	4	4
95	А	2 1/2	2 1/2	3	3	3	3	3	3	4	4	4
	Б	2 1/2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
		Кабель ВРГ-500										
1,5	А	3/4	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
	Б	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2
2,5	А	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
	Б	3/4	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2
4	А	3/4	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2
	Б	3/4	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2
6	А	3/4	1	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2
	Б	1	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2
10	А	1 1/4	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
	Б	1 1/4	1 1/4	1 1/2	2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
16	А	1 1/4	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
	Б	1 1/4	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3
25	А	1 1/2	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3
	Б	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3	3
35	Б	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3	3
	А	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3	4	4
50	А	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3	4	4	4
	Б	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	3	4	4	4	4
70	А	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3	3	4	4	4	4	4
	Б	2 1/2	2 1/2	3	3	3	3	4	4	4	4	—
95	А	2 1/2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	—
	Б	2 1/2	3	3	4	4	4	4	4	—	—	—

А — участок трубопровода с числом местных изгибов не более 2; *Б* — участок трубопровода с числом местных изгибов 3.

Таблица 27

Выбор диаметров стальных труб для совместной прокладки проводов ПР-500. ПРТО-500, ПРГ-500 и кабелей ВРГ и КВРГ разных сечений

Общее число проводов в трубе		Наибольшая допустимая величина C для труб диаметром в дюймах								
		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4
2	А	70	130	210	370	500	840	1360	1900	3300
	Б	55	100	160	280	370	620	1000	1400	2500
3	А	95	170	280	490	650	1080	1750	2500	4300
	Б	70	130	210	360	480	800	1300	1850	3200
4—6	А	100	180	285	500	680	1100	1850	2600	4500
	Б	75	140	220	390	510	850	1400	1950	3400
7	А	110	240	330	580	770	1300	2100	2950	5100
	Б	85	160	250	440	580	950	1500	2200	3850
8—10	А	95	170	285	500	650	1080	1750	2500	4300
	Б	70	130	210	370	500	810	1300	1850	3200
11	А	100	180	290	520	680	1100	1850	2600	4400
	Б	75	140	220	390	510	850	1400	1950	3400
12 и более	А	100	200	320	560	750	1200	2200	2850	4800
	Б	80	150	240	420	560	920	1500	2100	3700

А — участок трубы с двумя изгибами, *Б* — участок трубы с тремя изгибами.

Для выбора диаметра трубы, в которой проложены провода разных сечений, подсчитывается

$$C = n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2 + \ldots,$$

где n и d — соответственно число и диаметр в *мм* проводов данного сечения. Затем по табл. 27 для заданного общего количества проводов в трубе и заданного числа изгибов находится ближайшее большее значение C, а по нему и диаметр трубы.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

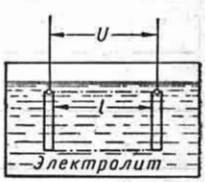
Электропроводность электролитов

Электролиты — растворы кислот, щелочей или солей. Молекулы в электролите частично распадаются на ионы: положительные (катионы) и отрицательные (анионы).

Электролитическая диссоциация — процесс распада (расщепления) молекул в растворе на ионы.

Степень диссоциации — отношение числа расщепленных молекул к общему числу молекул в электролите.

Электролиты обладают электропроводностью, которая зависит от концентрации и температуры.



Фиг. 37. К объяснению закона Ома для электролитов.

Закон Ома для электролитов (фиг. 37)

$$I = \frac{U}{r} a,$$

где $r = \frac{l}{\gamma S}$ — сопротивление электролита в *ом*. В этой формуле l — расстояние между электродами в *см*; S — площадь поперечного сечения электролита, находящегося между электродами.

Таблица 28

Удельная проводимость электролитов в 1/ом·см

Концентрация x	Кислоты			Щелочи		Соли				
	Серная	Азотная	Соляная	Едкое кали	Едкий натр	Медный купорос	Цинковый купорос	Углекислый натрий (сода)	Поваренная соль	Хлористый аммоний (нашатырь)
	H_2SO_4	HNO_3	HCl	KOH	NaOH	$CuSO_4$	$ZnSO_4$	Na_2CO_3	NaCl	NH_4Cl
0,05	208,5	258	395	172	197	18,9	19,1	45,1	67,2	92
0,10	391,5	461	630	315	312	32,0	32,1	70,5	121	178
0,15	543	613	745	425	346	42,1	41,5	83,6	164	259
0,20	653	710	761,5	499	327	—	46,8	—	196	336
0,25	717	770	723	540	272	—	48,1	—	214	404
0,30	739	785	662	542	202	—	44,2	—	—	—
0,40	680	733	515	450	116	—	—	—	—	—
0,50	540,5	630	—	—	—	—	—	—	—	—
0,60	373	513	—	—	—	—	—	—	—	—
0,70	216	396	—	—	—	—	—	—	—	—
0,80	110,5	267	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 29

Температурный коэффициент электролитов

Концентрация x	Кислоты		Щелочи		Соли				
	Серная	Соляная	Едкое кали	Едкий натр	Медный купорос	Цинковый купорос	Углекислый натрий (сода)	Поваренная соль	Хлористый аммоний (нашатырь)
	H_2SO_4	HCl	KOH	NaOH	$CuSO_4$	$ZnSO_4$	Na_2CO_3	NaCl	NH_4Cl
0,05	0,0121	0,0158	0,0187	0,0201	0,0216	0,0225	0,0252	0,0217	0,0198
0,10	0,0128	0,0156	0,0187	0,0217	0,0218	0,0223	0,0271	0,0217	0,0186
0,15	0,0136	0,0155	0,0190	0,0249	0,0231	0,0228	0,0294	0,0212	0,0171
0,20	0,0145	0,0154	0,0198	0,0299	—	0,0241	—	0,0216	0,0161
0,25	0,0154	—	0,0209	0,0368	—	—	—	—	—
0,30	0,0162	—	0,0222	0,0450	—	—	—	—	—
0,40	0,0178	—	0,027	0,0648	—	—	—	—	—
0,50	0,0193	—	—	—	—	—	—	—	—
0,60	0,0213	—	—	—	—	—	—	—	—
0,70	0,0256	—	—	—	—	—	—	—	—
0,80	0,0349	—	—	—	—	—	—	—	—

в $см^2$; γ — удельная проводимость электролита в $1/ом \cdot см$.

В табл. 28 приведены удельные проводимости, выраженные в $1/ом \cdot см$, различных электролитов при температуре 18° С в зависимости от концентрации x. Последняя представляет собой отношение веса растворенного вещества к весу раствора.

Если температура электролита отличается от 18° С, удельная проводимость его γ_t находится по формуле

$$\gamma_t = \gamma_0 \frac{1}{1 - \alpha (t - 18)},$$

где γ_0 — удельная проводимость при 18° С; α — температурный коэффициент электролита, находится по табл. 29 (для электролитов в отличие от металлов температурный коэффициент отрицателен); t — температура в °С, для которой определяется удельная проводимость.

Электролиз

Электролиз — выделение вещества на электродах при прохождении через электролит электрического тока. На катоде выделяются металлы или водород.

Закон Фарадея. Количество выделяемого из электролита вещества пропорционально количеству электричества, прошедшего через электролит:

$$G = cIt.$$

Если G выражать в *мГ*, I — в *а*, t — в сек., электрический эквивалент c выражается в *мГ/к*. Ниже приводятся значения электрохимического эквивалента.

Вещество	c в *мГ/к*
Алюминий	0,0932
Водород	0,01044
Железо двухвалентное	0,2893
„ трехвалентное	0,1929
Золото	0,6812
Калий	0,4052
Магний	0,1260
Медь одновалентная	0,6588
„ двухвалентная	0,3294
Натрий	0,2384
Никель двухвалентный	0,3041
„ трехвалентный	0,2027
Олово двухвалентное	0,6151
„ четырехвалентное	0,3075
Платина	0,5057
Ртуть одновалентная	2,0789
„ двухвалентная	1,0395
Свинец	1,0735
Серебро	1,1180
Цинк	0,3387

Электролиз применяется в электрометаллургии для получения или рафинирования цветных металлов; в гальваностегии, т. е. в процессах покрытия поверхности одного металла слоем другого; в гальванопластике, т. е. в процессах получения электролитическим путем рельефных поверхностей.

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

Гальванические элементы

Гальванический элемент состоит из двух электродов, выполняемых из разных металлов и погруженных в электролит. Между ними возникает э. д. с., а при замкнутой внешней цепи — электрический ток. Электрическая энергия гальванических элементов получается за счет энергии химических реакций. Эти реакции необратимы, т. е. после разряда действие гальванического элемента не может быть восстановлено обратным пропусканием через него электрического тока.

Покрытие анода слоем водорода, что при работе элемента приводит к уменьшению напряжения на его зажимах, называется *поляризацией элемента*.

Вещества, легко отдающие кислород, вступающий в химическую реакцию с водородом анода, называются *деполяризаторами*. Они нейтрализуют вредное влияние поляризации.

Международный нормальный элемент — насыщенный кадмиевый элемент Вестона — принят, как эталон э. д. с. При температуре 20° С его э. д. с $E = 1{,}0183$ *в*. Наибольший ток, который можно брать от этого элемента, не опасаясь поляризации, равен 0,00005 *а*. Внутреннее сопротивление такого элемента колеблется в зависимости от размеров от 500 до 1000 *ом*, внешнее сопротивление — порядка 200 000 — 300 000 *ом*.

Элемент Даниеля имеет в качестве катода цинк, погруженный в раствор $ZnSO_4$ и заключенный в пористый глиняный сосуд. Этот сосуд в свою очередь погружен в сосуд с раствором $CuSO_4$, в котором находится медный анод. Начальная э. д. с. $E = 1{,}1$ *в*.

Элемент Лекланше имеет в качестве катода цинк, в качестве анода — перекись марганца с углеродом. Электролитом служит 20%-ный раствор нашатыря (NH_4Cl). Начальная э. д. с. 1,3—1,5 *в* при разряде быстро падает до 1,2—1,1 *в* и затем медленно изменяется до 0,8—0,7 *в*.

Сухие элементы являются разновидностью элементов Лекланше и отличаются от них тем, что электролит сухого элемента лишен подвижности добавлением к нему крахмала, муки, опилок и т. д.

Водоналивные элементы представляют те же сухие элементы, но без электролита. В них заранее вкладывается сухой нашатырь (NH_4Cl), который растворяется при заливе элемента водой. Водоналивные элементы допускают более длительный срок хранения в незалитом состоянии.

Классификация элементов. По температуростойкости различают:

а) элементы (или батареи) летние (в условном наименовании обозначаются буквой *Л*); их испытательный температурный режим +20 ±5° С; в зависимости от рода электролита могут работать в пределах температур от +60 до —20° С, но со снижением емкости;

б) элементы (или батареи) холодостойкие (в условном наименовании обозначаются буквой *Х*); испытательный температурный режим +20 ±5° С; могут работать со сниженными показате-

лями в пределах температур от +40 до —50° С.

в) элементы (батареи) универсальные (в обозначении буква *У*); могут работать при температурах от +60 до —50° С.

По назначению различают:

а) батареи радиоанодные для напряжений от 68 до 160 *в*, емкостью от 0,36 до 7 *а-ч* при 20° С;

б) элементы и батареи радионакальные напряжением от 1,3 до 5,5 *в* и емкостью при 20° С от 5,2 до 500 *а-ч*;

в) элементы и батареи для телефонии и сигнализации напряжением от 1,35 до 5 *в* номинальной емкостью от 3 до 150 *а-ч*;

г) элементы и батареи для карманных фонарей напряжением от 1,3 до 3,7 *в*, емкостью от 0,25 до 0,55 *а-ч*.

Выпускаются также гальванические элементы и батареи для специальных целей.

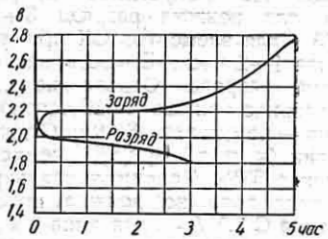
Аккумуляторы

Аккумулятор — гальванический элемент, в котором химические реакции обратимы. Аккумулятор преобразовывает химическую энергию в электрическую и может быть заряжен вновь пропусканием через него постоянного тока в обратном направлении.

В практике применяются свинцовые (кислотные) и щелочные аккумуляторы.

Свинцовые (кислотные) аккумуляторы. *Электроды*: анод—перекись свинца (PbO_2); катод — чистый свинец (Pb). *Электролит* — раствор серной кислоты (H_2SO_4).

Удельный вес электролита — отношение его веса к весу такого же объема чистой воды при данной температуре.



Фиг. 38. Кривые заряда и разряда кислотных аккумуляторов.

Характеристика растворов серной кислоты дана в табл. 30.

При изменении степени заряда (или разряда) данной аккумуляторной батареи изменяется удельный вес электролита и напряжение ее. Удельный вес имеет наибольшую величину при полностью заряженной батарее (табл. 31) и уменьшается к концу разряда. О степени заряда (разряда) аккумуляторной батареи можно судить по удельному весу электролита.

Примерные кривые изменения напряжения аккумулятора при заряде и разряде его даны на фиг. 38. Напряжение

Таблица 30

Характеристика растворов серной кислоты

Удельный вес при 15° С	Удельный вес при 25° С	Содержание H_2SO_4 в % по весу	Содержание H_2SO_4 в % по объему	Плотность в градусах Боме
1,000	1,000	0,0	0,0	0,0
1,020	1,019	2,9	1,6	2,8
1,040	1,039	5,9	3,3	5,6
1,060	1,058	8,7	5,0	8,2
1,080	1,078	11,5	6,7	10,7
1,100	1,097	14,3	8,5	13,2
1,120	1,117	17,0	10,3	15,5
1,140	1,137	19,6	12,1	17,8
1,160	1,156	22,1	13,9	20,0
1,180	1,176	24,7	15,8	22,1
1,200	1,196	27,2	17,7	24,2
1,220	1,216	29,6	19,6	26,1
1,240	1,235	32,0	21,6	28,1
1,260	1,255	34,4	23,6	29,9
1,280	1,275	36,8	25,6	31,7
1,300	1,295	39,1	27,6	33,5

Таблица 31

Удельный вес электролита аккумуляторных батарей различного назначения при полной их зарядке

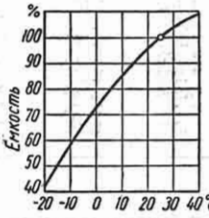
Назначение батареи	Удельный вес электролита при полной зарядке батареи
Стационарные (при 25° С)	1,205—1,24
Стартерные для автомобилей и автобусов (при 15° С)	
а) Крайние северные районы с температурой ниже минус 35° С зимой	1,310
б) Центральные и северные районы с температурой до минус 35° С зимой	1,285
в) Южные районы зимой	1,270
г) Крайние северные и центральные районы летом	1,270
д) Южные районы летом	1,240
Для рудничных электровозов и электрокар (при 30° С)	1,265
Радионакальные (при 30° С)	1,26—1,27
Радиоанодные (при 30° С)	1,24
Для освещения железнодорожных поездов (при 30° С)	1,265

аккумулятора в конце разряда не должно быть меньше 1,7—1,8 *в*; э. д. с. вполне заряженного аккумулятора имеет величину около 2,1 *в*.

Емкость — количество электричества в *а-ч*, отданное аккумулятором в процессе разряда (или полученное им в процессе заряда).

Емкость (разрядная) данного аккумулятора зависит от величины разрядного тока и температуры. Она уменьшается с увеличением разрядного тока (фиг. 39) и понижением температуры электролита. На фиг. 39 и 40 приведены примерные кривые зависимости разрядной емкости от режима разряда в часах и температуры электролита.

Фиг. 39. Зависимость емкости кислотного аккумулятора от режима разряда.



Фиг. 40. Зависимость емкости кислотного аккумулятора от температуры.

Отдача и коэффициент полезного действия. Различают отдачу по емкости (амперчасовая отдача) и энергии (ваттчасовая отдача).

Отдачей аккумулятора по емкости называется выраженное в процентах отношение емкости в амперчасах, полученной от аккумулятора при его разряде, к тому количеству амперчасов, которое потребуется после этого для полного его заряда.

Отдачей аккумулятора по энергии (коэффициентом полезного действия) называется выраженное в процентах отношение электрической энергии в ваттчасах, полученной от аккумулятора при его разряде, к тому количеству ваттчасов, которое потребуется для полного его заряда.

Основные способы заряда батарей. а) При постоянной величине тока. Максимальный зарядный ток не должен превышать 2,5—4-часового разрядного тока; напряжение источника тока в процессе заряда должно постепенно повышаться; к концу заряда начинается обильное газовыделение, после чего величина зарядного тока снижается до ~40% начальной; заряд прекращается при появлении повторного обильного газообразования.

б) При постоянном напряжении. Напряжение на зажимах батареи поддерживается постоянным и равным ~2,3 *в* на элемент; ток в процессе заряда уменьшается, достигая почти нулевого значения при полном заряде батареи.

в) Для стационарных аккумуляторов может применяться режим постоянного подзаряда при напряжении 2,15 ± 0,05 *в* на элемент. Сила тока должна быть

$$I_п = \frac{0{,}03 C_н}{36},$$

где $C_н$ — номинальная емкость аккумулятора в *а-ч*. При работе в этом режиме каждый аккумулятор должен отдавать в течение 3 мес. не менее 100% своей емкости.

Электрические свинцовые аккумуляторы для стационарных установок по ГОСТ 825-41: типа С — с положительными пластинами поверхностного типа и СП — панцырного типа — для продолжительных разрядных режимов и соответственно типов СК и СПК для коротких разрядных режимов. Номинальная емкость соответствует 10-часовому режиму разряда. Изготовляются емкостью от 36 до 5328 *а-ч*. Номинальное напряжение 2 *в* (наименьшее значение напряжения на зажимах вполне заряженного аккумулятора в течение первого часа его разряда при 10-часовом режиме разряда). Номинальный ток — ток 10-часового разряда. Удельный вес электролита в начале разряда 1,205, в конце разряда 1,16. Наименьшее допустимое напряжение 1,8 *в* для режима разряда 3—10 час. и 1,75 *в* для элементов СК при режиме разряда 1—2 часа. Емкость зависит от режима разряда. Отдача по емкости при разряде токами 3—10-часового режимов — не менее 84%. Отдача по энергии (к. п. д.) при тех же условиях не менее 65%. Максимальная зарядная величина тока не должна превышать для типа С 2,5 $I_{ном}$; для типа СК 3 $I_{ном}$. Э. д. с. вполне заряженного аккумулятора (установившееся напряжение при разомкнутой цепи) 2,05—2,1 *в*.

Стартерные свинцовые аккумуляторные батареи по ГОСТ 959-51. Изготовляются на напряжение 6 *в* (три элемента) номинальной емкостью от 60 до

Таблица 32

Габаритные размеры и электрические характеристики стартерных свинцовых батарей

Тип батареи	Емкость *а-ч*			Разрядный ток в *а*		Габаритные размеры в *мм*		
	при 10-часовом разряде и температуре +30° С	при стартерном разряде и начальной температуре электролита в °С		при 10-часовом режиме разряда	при стартерном режиме разряда	Ширина не более	Длина не более	Высота не более
		+30 ±2	−18 ±2					
3СТ-60	60	16,5	6,7	6,0	180	178	179	237
3СТ-70	70	19,2	7,8	7,0	210	194	257	230
3СТ-84	84	22,8	9,3	8,4	250	188	272	230
3СТ-98	98	27,0	11,0	9,8	295	188	308	245
3СТ-112	112	30,7	12,5	11,2	335	188	340	245
3СТ-126	126	34,8	14,2	12,6	380	188	386	245
3СТ-135	135	37,1	15,1	13,5	405	180	335	240
6СТ-54	54	14,6	6,0	5,4	160	182	283	237
6СТ-68	68	18,7	7,6	6,8	205	183	358	236

Минимальная длительность стартерного разряда при температуре +30 ±2° С составляет 5,5 мин., при температуре −18 ±2° С — 2,25 мин.

135 *а-ч* и 12 *в* (шесть элементов) емкостью 54 и 68 *а-ч*. Номинальная емкость определяется 10-часовым режимом непрерывного разряда.

В табл. 32 приведены основные технические данные стартерных свинцовых батарей.

Щелочные аккумуляторы. Щелочные аккумуляторы (табл. 33) рассчитаны на длительные режимы — 5 час. и более.

В СССР применяются железо-никелевые и кадмиево-никелевые щелочные аккумуляторы.

Электролиты: для аккумуляторов, работающих при температурах не ниже минус 15° С, применяется водный раствор едкого кали удельного веса 1,19—1,21 с добавкой моногидрата лития в количестве 20 *г/л*; при температурах ниже минус 15° С применяется водный раствор едкого кали удельного веса 1,25—1,27.

Емкость щелочных аккумуляторов зависит от температуры.

Железо-никелевые аккумуляторы при минус 20° С имеют емкость не менее 70% номинальной; кадмиево-никелевые аккумуляторы при минус 20° С имеют емкость не менее 75%, а при минус 40° С — не менее 20% номинальной.

В отличие от свинцовых аккумуляторов емкость щелочных аккумуляторов не зависит от режима разряда (разрядного тока). С увеличением разрядного тока уменьшается напряжение в конце разряда.

Нормальный режим заряда — 6 час. Напряжение полностью заряженного элемента не должно быть ниже 1,3 *в*.

Нормальный режим разряда — 8-часовой. Номинальное напряжение щелочного аккумулятора принимается равным 1,25 *в*.

В табл. 33 приведены электрические характеристики щелочных аккумуляторов.

Кроме перечисленных в табл. 33, выпускаются тяговые железо-никелевые аккумуляторы типа ТЖН емкостью 250, 300, 350 и 500 *а-ч*.

Согласно ГОСТ 5490-50 железо-никелевые аккумуляторы комплектуются в батареи напряжением от 5 до 12,5 *в*. Кадмиево-никелевые аккумуляторы по ГОСТ 3894-47 комплектуются в батареи напряжением от 5 до 80 *в*.

При размещении щелочных батарей следует иметь в виду, что их нельзя располагать в одном помещении с кислотными батареями. Вентиляционные системы кислотных и щелочных батарей не должны сообщаться между собой.

Таблица 33

Электрические характеристики щелочных аккумуляторов

Тип аккумулятора	Номинальная емкость в *а-ч*	6-часовой режим заряда (нормальный)		8-часовой режим разряда		Часовой режима разряда		Отдача при 6-часовом режиме заряда и 8-часовом режиме разряда	
		Сила тока в *а*	Емкость, сообщенная при заряде, в *а-ч*	Сила тока в *а*	Напряжение в конце разряда в *в*	Сила тока в *а*	Напряжение в конце разряда в *в*	по емкости в %	по энергии в %
Железо-никелевые аккумуляторы (по ГОСТ 5491-50)									
ЖН-22	22	5,5	33	2,75	1,0	22	0,5	66,6	47
ЖН-45	45	11,25	67,5	5,65	1,0	45	0,5	66,6	47
ЖН-60	60	15	90	7,5	1,0	60	0,5	66.6	47
ЖН-100	100	25	150	12,5	1,0	100	0,5	66,6	47
Кадмиево-никелевые аккумуляторы (по ГОСТ 3895-47)									
НКН-2,25	2,25	0,56	3,36	0,28	1,0	2,25	0,5	66,6	50,0
НКН-10	10	2,5	15	1,25	1,0	10	0,5	66,6	50,0
НКН-22	22	5,5	33	2,75	1.0	22	0,5	66,6	50,0
НКН-45	45	11,25	67,5	5,65	1,0	45	0,5	66,6	50,0
НКН-60	60	15	90	7,5	1,0	60	0,5	66,6	50,0
НКН-100	100	25	150	12,5	1,0	100	0,5	66,6	50,0

Примечание. Номинальная емкость аккумулятора представляет собой наименьшее значение емкости при 8-часовом режиме разряда до конечного напряжения 1 *в* при температуре электролита от +20 до +35° С.

ЭЛЕКТРОНИКА

Электронные приборы

Электрон представляет собой мельчайшую частицу отрицательного электрического заряда, величина которого равна $e = 1{,}605 \cdot 10^{-19}$ *к* или $e = 4{,}803 \times \times 10^{-10}$ абсолютной электростатической единицы.

Масса электрона $m = 9{,}108 \cdot 10^{-28}$ *г*. Находясь в вакууме и будучи помещен в электрическом поле, электрон свободно перемещается в направлении более высокого потенциала (от минуса к плюсу).

Электронная эмиссия — явление вылета электронов с поверхности тел. В электровакуумной технике преимущественное распространение получили следующие три вида эмиссии:

а) термоэлектронная эмиссия, т. е. появление потока свободных электронов при нагревании тела (обычно металла); количество выделяемых электронов зависит как от рода металла, так и от его температуры; с увеличением последней термоэлектронная эмиссия резко возрастает;

б) фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект) — явление испускания электронов металлами при освещении их светом различной длины волны; количество испускаемых электронов пропорционально интенсивности падающего на металл света и зависит от рода металла (закон Столетова);

в) автоэлектронная (холодная) эмиссия — явление вылета электронов из металла под действием сильного электрического поля у поверхности катода.

Пространственный заряд представляет собой облако электронов, образующееся у поверхности катода. Это облако заряжено отрицательно и при отсутствии электрического поля мешает вылету дальнейших электронов с поверхности катода. При появлении электрического поля электроны из пространственного заряда перемещаются к аноду. Таким образом, пространственный заряд является источником электронов.

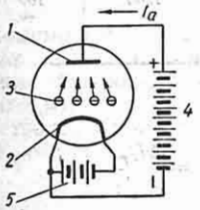
Электронные лампы. Двухэлектродная вакуумная лампа (диод, кенотрон) представляет собой (фиг. 41) стеклянный или металлический баллон (колбу), из которого откачан

воздух. В баллон впаяны металлические анод и накаливаемый катод. Если анод присоединить к плюсу источника тока, а катод — к минусу, электроны начнут перемещаться от катода к аноду, и в цепи потечет ток I_a, направление которого принимается противоположным направлению движения электронов.

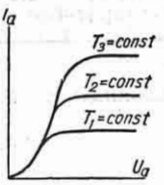
Величина анодного тока зависит от анодного напряжения и при данной постоянной температуре катода подчиняется „закону трех вторых“:

$$I_a = kU_a^{3/2}.$$

Коэффициент k зависит от размеров, формы и расположения электродов, На фиг. 42 приведены *вольтамперные*



Фиг. 41. Схема двухэлектродной лампы; *1* — анод; *2* — катод; *3*— электроны; *4*— анодная батарея; *5*—батарея накала.

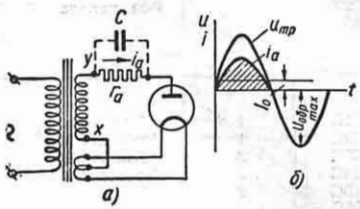


Фиг. 42. Вольтамперные характеристики двухэлектродной лампы.

характеристики диода для разных температур катода. Начиная с некоторого момента, увеличение U_a не оказывает влияния на I_a. Эта предельная для данной температуры катода величина анодного тока называется *током насыщения* и соответствует состоянию, когда все эмитированные катодом электроны достигают анода.

Если анод лампы присоединить к минусу, а катод (нить) — к плюсу, электроны будут отбрасываться электрическим полем обратно на катод, и ток через лампу протекать не будет. Таким образом, двухэлектродная лампа пропускает ток только в одном направлении, т. е. может служить *выпрямителем переменного тока в постоянный.*

На фиг. 43, *а* и *б* дана принципиальная схема и кривые тока и напряжения однополупериодного выпрямления при работе на активную нагрузку r_a. На фиг. 43 обозначено: U_{mp} — напряжение на вторичных зажимах x, y трансформатора; i_a — ток, протекающий через сопротивление r_a (выпрямленный ток); I_0 — среднее значение выпрямленного тока за период; $U_{обр\ max}$ — наибольшее обратное напряжение, действующее между анодом и катодом в отрицательный полупериод.

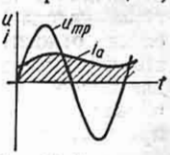


Фиг. 43. Схема однополупериодного выпрямителя.

Коэффициент пульсации этой схемы

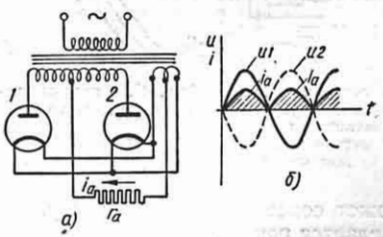
$$p = \frac{I_{a\ max}}{I_0} = 3{,}14.$$

Включение параллельно нагрузке конденсатора C (пунктир на фиг. 43, *а*) значительно уменьшает коэффициент пульсации (фиг. 44).



Фиг. 44. Кривая выпрямленного тока при включении конденсатора.

На фиг. 45, *а* и *б* представлены схема и кривые выпрямленного тока i_a и напряжения *u1* и *u2* двухполупериодного выпрямления двумя кенотронами *1* и 2 с нулевой точкой. На фиг. 46 дана та же схема, но с использованием двуханодного кенотрона. Коэффициент пульсации этой схемы при работе ее на активную нагрузку $p = 1{,}57$.



Фиг. 45. Схема двухполупериодного выпрямителя на двух диодах.

Параметры диодов приведены в табл. 34.

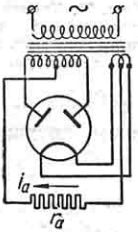
Трехэлектродная лампа (триод) имеет дополнительный электрод-сетку, размещаемую вблизи катода. Анодный ток лампы зависит не только

Таблица 34

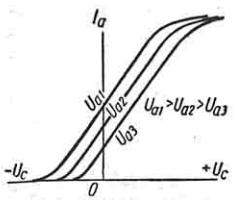
Параметры некоторых отечественных диодов

Тип	Количество анодов	Род накала	Накал		Предельное обратное напряжение в *в*	Максимальный анодный ток (амплитуда) $I_{a\ max}$ в *ма*	Анодный ток лампы I_a в *ма*
			$U_н$ в *в*	$I_н$ в *а*			
1Ц1С	1	Прямой	0,7	0,18	10 000	1	—
2Ц2С	1	Косвенный	2,5	1,75	12 500	100	7,5
5Ц3С	2	Прямой	5,0	3,0	1 700	675	225
5Ц4С	2	Косвенный	5,0	2,0	1 400	375	125
6Ц5С	2	„	6,3	0,6	1 375	210	70
6Х6С	2	„	6,3	0,3	465	50	16
30Ц1М	1	„	30	0,3	500	500	90
30Ц6С	2	„	30	0,3	500	250	120
В0-188	2	Прямой	4,0	2,05	1 300	—	130
В0-230	1	„	4,0	0,7	900	—	50
В0-239	2	„	4,0	2,05	1 800	1200	180
30П1С	1	Косвенный	30	0,3	110	—	—

от анодного напряжения U_a и температуры катода T, но и от потенциала сетки относительно катода. Положительно заряженная сетка способствует движению электронов к аноду и увеличивает I_a; отрицательно заряженная сетка препятствует движению электронов и при достаточно низком U_c



Фиг. 46. Схема двухполупериодного выпрямителя на двойном диоде.



Фиг. 47. Сеточные характеристики триода.

может совсем „запереть" лампу, т. е. I_a сделается равным нулю.

На фиг. 47 приведены сеточные характеристики $I_a = f(U_c)$ триода для различных значений анодного напряжения U_a при неизменной температуре катода.

Параметры триода:

статический коэффициент усиления

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$$

при $I_a = \text{const}$;

проницаемость

$$D = \frac{1}{\mu} = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a}$$

при $I_a = \text{const}$;

крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}\ ма/в$$

при $U_a = \text{const}$;

внутреннее сопротивление триода

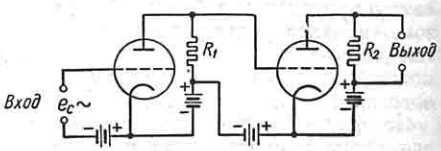
$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

при $U_c = \text{const}$.

Параметры триода связаны соотношением

$$DSR_i = 1.$$

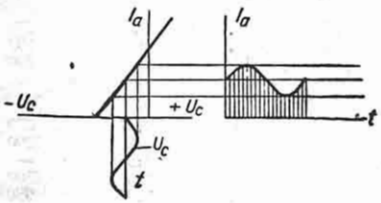
Из характеристик видно, что небольшими изменениями потенциала сетки U_c можно управлять относительно большими анодными токами I_a триода. По-



Фиг. 48. Схема двухкаскадного усилителя на постоянном токе.

этому основным назначением триода является усиление слабых переменных токов. На фиг. 48 приведена простейшая

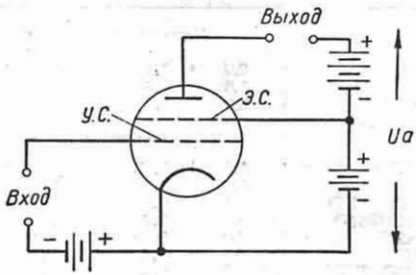
схема двухкаскадного усилителя на постоянном токе. Напряжение e_c подается на сетку первого триода. Усиленный им ток подается на сопротивление R_1 и еще раз усиливается вторым триодом. На фиг. 49 приведен график, поясняющий усилительное действие триода. Параметры триодов приведены в табл. 35.



Фиг. 49. К объяснению усилительного действия триода.

Помимо перечисленных выше находят также применение четырехэлектродные лампы (тетроды) и пятиэлектродные (пентоды).

Тетроды, кроме управляющей, имеют еще вторую сетку экранирующую или сдвигающую. Эта сетка располагается ближе к аноду и получает некоторый положительный (относительно катода) потенциал. Она служит для повышения коэффициента усиления лампы без уменьшения крутизны ее характеристики.



Фиг. 50. Схема включения тетрода.

Схема включения тетрода приведена на фиг. 50.

В табл. 36 даются параметры некоторых отечественных тетродов.

Таблица 35

Параметры некоторых отечественных триодов

Тип	Накал		Анодные		Мощность P_a в *вт*	Крутизна характеристики S в *ма/в*	Коэффициент усиления μ
	$U_н$ в *в*	$I_н$ в *а*	U_a в *в*	I_a в *ма*			
УБ-240	2,0	0,12	120	3,5	0,6	1,55	22
2С4С/2А3	2,0	2,5	250	60	15	5,25	4,2
УО-186	4,0	1,0	250	57	15	3,2	4
6С2С (6Ж5)	6,3	0,3	250	9	—	2,6	20
6Ф5	6,3	0,3	250	0,9	0,4	1,5	100
6С5	6,3	0,3	250	8,0	2,5	2,2	20
6С4С (6В4)	6,3	1,0	250	60	15	5,25	4,2
СО-243	2,0	0,24	120	3,2	1,5	2,1	32
6Н7С (6N7)	6,3	0,8	300	35	7	3,2	35
6Н8С (6Н8М)	6,3	0,6	250	9	2,5	2,6	20
6Н9С (6Н9М)	6,3	0,3	250	2,3	1,1	1,6	70

Таблица 36

Параметры некоторых отечественных тетродов

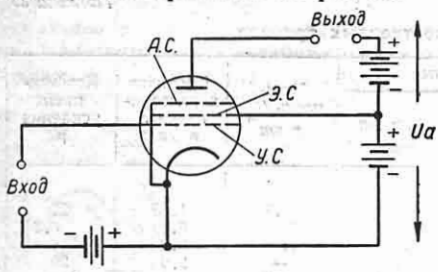
Тип	Накал		Анодные		$U_{с.э}$ в *в*	Мощность P_a в *вт*	Крутизна характеристики S в *ма/в*	Коэффициент усиления μ
	$U_н$ в *в*	$I_н$ в *а*	U_a в *в*	I_a в *ма*				
2П9М	2,0	2,5	250	60	—	3,5	5,25	4,2
6П6С (6V6—6Г)	6,3	0,45	250	45	250	13,2	4,1	220
6П3С (6П3)	6,3	0,9	250	78	250	20,5	8	135
30П1С (30П1М)	30	0,3	110	70	110	7	10	—
25П1С	25	0,3	110	80	110	10	8,5	--

Таблица 37

Параметры некоторых отечественных пентодов

Тип	Накал		Анодные		$U_{с.э}$ в в	Мощность P_a в вт	Крутизна характеристики S в ма/в	Коэффициент усиления μ
	$U_н$ в в	$I_н$ в а	U_a в в	I_a в ма				
Низкочастотные пентоды (пентоды мощности)								
СО-244	2,0	0,185	120	4,1	120	1,5	1,8	270
СО-258	1,8	0,32	160	10	120	2,0	2	160
6Ф6С	6,3	0,7	250	34	250	12	2,5	200
Высокочастотные пентоды (пентоды напряжения)								
1Ж2М	1,2	0,03	70	1,1	70	—	0,47	350
2Ж2М	2,0	0,06	120	1,0	70	0,5	0,8	1200
6Ж3 (6SH7)	6,3	0,3	250	10,8	150	3,3	4,9	—
6Ж8 (6SJ7)	6,3	0,3	250	3	100	2,8	1,65	2500
2К2М	2,0	0,06	120	2	70	0,5	0,95	950
6К7	6,3	0,3	250	7	100	3,0	1,45	1200
6К9С (6К9М)	6,3	0,3	250	12,5	125	—	1,65	1000
6К4 (6SG7)	6,3	0,3	250	9,2	150	3,3	4,0	—
6К3 (6SK7)	6,3	0,3	250	9,2	100	4,4	2,0	1600
6Ж7	6,3	0,3	250	2	100	0,8	1,2	—
6Ж6С (Z-62-Д)	6,3	0,5	250	10	100	2,5	10	—

Пентоды имеют дополнительно третью антидинатронную сетку. Схема включения пентода приведена на фиг. 51.



Фиг. 51. Схема включения пентода.

Данные некоторых отечественных пентодов приведены в табл. 37.

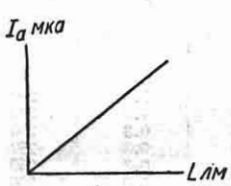
В практике находят применение и более сложные комбинированные лампы.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом — приборы, которые основаны на явлении фотоэлектронной эмиссии. Фотоэлемент состоит из стеклянного баллона, воздух из которого откачан до высокого вакуума. Внутри помещены кольцеобразный анод и катод в виде тонкого слоя светочувствительного металла (цезий, калий), нанесенного на внутреннюю поверхность баллона по серебряной подкладке.

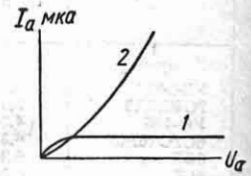
Фиг. 52. Схема включения фотоэлемента: *1* — анод; *2* — катод; *3* — гальванометр.

Если фотоэлемент присоединить к источнику тока (фиг. 52), то при засвечивании его в цепи потечет электрический ток.

Световая характеристика фотоэлемента $I_a = f(L)$ при $U_a = \text{const}$, где L — световой поток, падающий на катод, приведена на фиг. 53.



Фиг. 53.



Фиг. 54.

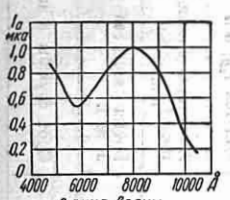
Вольтамперные характеристики $I_a = f(U_a)$ при $L = \text{const}$ приведены на фиг. 54: *1* — для вакуумного фотоэлемента; *2* — для газонаполненного фотоэлемента.

Чувствительность фотоэлемента — отношение величины фототока к световому потоку, падающему на катод.

Чувствительность фотоэлемента измеряется в *мка/лм* и зависит от длины волны светового потока и материала катода.

Интегральная чувствительность относится к неразложенному свету вольфрамовой лампы накаливания, нить которой находится при цветовой температуре 2848° К.

Спектральная характеристика — зависимость чувствительности от длины волны падающей на фотоэлемент лучистой энергии. На фиг. 55 дана спектральная характеристика кислородно-цезиевого катода. Селективный максимум чувствительности имеет место при 8000 Å [1 ангстрем (Å) равен 0,1 *ммк* или 0,0001 *мк*].



Фиг. 55.

Чувствительность фотоэлементов очень мала. Для ее усиления колба фотоэлемента наполняется инертным газом (гелий, аргон) давлением 0,001—0,01 *мм* рт. ст. Фототок газонаполненных фотоэлементов вследствие ионизации газа усиливается в 8—10 раз. Однако и этого усиления недостаточно, и в практике прибегают к использованию усилительных ламп. Параметры фотоэлементов приведены в табл. 38.

Таблица 38

Параметры некоторых отечественных фотоэлементов

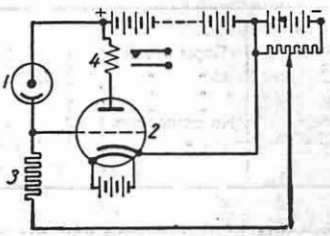
Тип фотоэлемента	Рабочее напряжение U_a в *в*	Интегральная чувствительность в *мка/лм*	Напряжение зажигания $U_з$ в *в*	Темновой ток I_d в *а*	Крутизна вольтамперной характеристики в рабочей точке
ЦГ-1	240	100	320	$1 \cdot 10^{-7}$	5—6
ЦГ-3	240	150	300	$1 \cdot 10^{-7}$	5—6
ЦГ-4	240	150	310	$1 \cdot 10^{-7}$	5—6
ЦГН-4	90	100	140	$1 \cdot 10^{-7}$	6—7
СЦВ-51	90—240	80	—	$1 \cdot 10^{-8}$	—
СЦВ-4	90—240	80	—	$1 \cdot 10^{-8}$	—

Примечание. Фотоэлементы типов ЦГ и ЦГН—газонаполненные с кислородно-цезиевым катодом; элементы типа СЦВ — вакуумные, с сурьмяно-цезиевым катодом.

Комплектный аппарат с фотоэлементом, усилительными устройствами, оконечным электромагнитным реле и питающими устройствами (выпрямитель, трансформатор) называется *фотореле*; одна из простейших схем фотореле представлена на фиг. 56.

При незасвеченном фотоэлементе ток через него не течет, усилительная лампа заперта отрицательным потенциалом сетки, и электромагнитное реле не возбуждено.

При засвечивании фотоэлемента через него потечет ток, который вызовет падение напряжения в сеточном сопротивлении, потенциал сетки повысится, в усилительной лампе появится анодный ток, и электромагнитное реле сработает.



Фиг. 56. Схема фотореле: *1* — фотоэлемент; *2* — усилительная лампа; *3* — сеточное сопротивление; *4* — электромагнитное реле.

В СССР разработаны также фотоэлементы со вторичной эмиссией (фотоумножители), которые *имеют несколько анодов* и обладают огромной чувствительностью, доходящей до 4 *а/лм*.

Наряду с фотоэлементами с внешним фотоэффектом находят иногда применение фотоэлементы с запирающим слоем и фотосопротивления.

Ионные приборы

В ионных приборах в отличие от электронных имеется инертный газ или пары ртути под небольшим давлением.

Вылетающие с поверхности катода первичные электроны сталкиваются с молекулами газа или пара и ионизируют их. Вследствие этого поток электронов, падающих на анод, значительно усиливается, что означает соответственное увеличение силы тока прибора по сравнению с чисто электронным процессом.

Газотроны (табл. 39). Газотрон состоит из двух электродов — накаленного катода, являющегося источником первичных электронов, и холодного анода, помещенных в стеклянный или металлический баллон, наполненный парами ртути.

Таблица 39

Параметры некоторых отечественных газотронов

Тип	Наполнение	Количество анодов	Накал: Ток $I_н$ в *а*	Накал: Напряжение $U_н$ в *в*	Падение напряжения ΔU_a в *в*	Допустимое обратное напряжение $U_{обр}$ в *в*	Напряжение зажигания $U_з$ в *в*	Средний выпрямленный ток I_{a0} в *а*	Амплитуда анодного тока $I_{a\,max}$ в *а*	Время разогрева в мин.	Срок службы в час.
ВГ-129	Пары ртути	1	10	2,5	15	5 000	20	0,6	1,5	3	1500
ВГ-236	" "	1	20	2,5	16	13 000	25	1,3	4,0	5	2000
ВГ-237	" "	1	22	5,0	16	15 000	25	3,5	10,0	5	2000
ВГ-163	" "	1	32	5,0	18	18 000	60	16,0	50,0	30	3000
ВГ-176	Инертный газ	2	11	2,5	14	150	20	6	9	0,5	1000
ВГ-75(15000)	" "	1	42	5,0	20	15 000	—	25	75	30	2000

Газотроны применяются как выпрямители и отличаются малым внутренним падением напряжения (14—20 *в*). Очень важным параметром газотрона является напряжение обратного зажигания $U_{обр}$ (пробивное напряжение).

Тиратрон (табл. 40) — газоразрядный прибор, имеющий, кроме анода и накаливаемого катода, еще один электрод — сетку (может иметь несколько сеток). Тиратрон заполняется либо парами ртути при рабочем давлении их 0,01—0,001 *мм* рт. ст., либо инертным газом — аргоном или неоном — при давлении 0,2—0,4 *мм* рт. ст. Ток через тиратрон может протекать только в одном направлении — от анода к катоду. В тиратроне сетка в отличие от триода управляет только моментом начала разряда, после чего изменение сеточного потенциала уже не влияет на величину анодного тока. Раз начавшийся разряд можно прекратить, переменив полярность на зажимах тиратрона или сняв анодное напряжение.

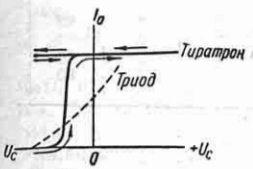
На фиг. 57 приведена сеточная характеристика тиратрона и для сравнения там же дана сеточная характеристика триода.

Таблица 40

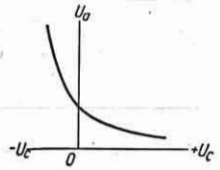
Параметры некоторых отечественных тиратронов

Тип	Наполнение	Накал: $U_н$ в *в*	Накал: $I_н$ в *а*	Падение напряжения ΔU_a в *в*	Максимальное напряжение зажигания в *в*	Максимальное обратное напряжение в *в*	Максимальное сеточное напряжение $U_{c\,max}$ в *в*	Максимальный анодный ток $I_{a\,max}$ в *а*	Средний анодный ток $I_{a\,ср}$ в *а*	Срок службы в час.	Время разогрева в мин.
ТГ-212	Газ	4	2,3	27	30	300	20	0,5	0,125	500	1
ТГ-213	"	2,5	11,0	25	50	500	15	1,5	0,5	500	0,7
ТГ-235	"	5	13,5	25	70	700	16	6	1,5	500	0,7
ТГ1-0,1/0,3	"	6,3	0,6	16	—	350	—	0,3	0,075	—	0,5
ТГ2-0,1/0,1	"	6,3	0,6	11	—	450	—	0,3	0,1	250	0,2
ТГ3-0,1/1,3	"	6,3	0,65	8	25	1300	—	0,3	0,1	—	0,5
ТГ1-2,5/4	"	5	15	25	150	3 000	18	8	2,5	500	0,7
ТР1-5/2	Пары ртути	5	15	12	—	2 000	10	15	5	—	—
ТГ1-5/3	Газ	5	20	25	150	3 000	15	15	5	800	0,7
ТР1-40/15	Пары ртути	5	100	—	—	15 000	60	120	40	3000	40
ТР1-6/15	" "	5	20	—	—	15 000	—	20	—	—	1

Пусковая характеристика тиратрона (фиг. 58) дает зависимость между потенциалом сетки U_c и потенциалом анода U_a, при которых начинается разряд. Величина рабочего напряжения тиратрона определяется напряжением его обратного зажигания $U_{обр}$ (табл. 40).



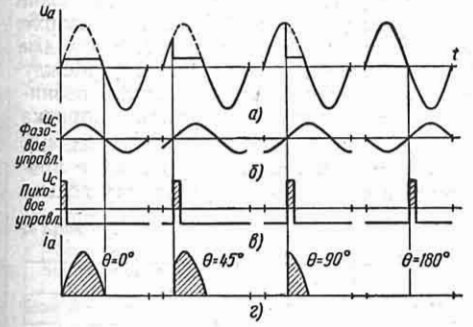
Фиг. 57. Сеточные характеристики тиратрона и триода.



Фиг. 58. Пусковая характеристика тиратрона.

Величина тока, протекающего через тиратрон, зависит от анодного напряжения и сопротивления анодной цепи. Падение напряжения в работающем тиратроне не зависит от величины тока (табл. 40). При присоединении анодной цепи тиратрона к источнику переменного тока средняя величина выпрямленного тока будет зависеть от продолжительности разряда за период. В практике применяются фазовый и пиковый способы управления анодным током.

При фазовом способе на сетку подается переменное напряжение. Оно может быть сдвинуто по фазе относительно анодного напряжения на угол



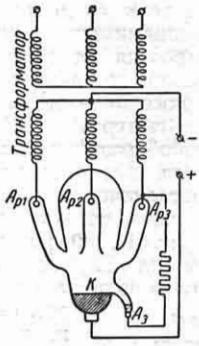
Фиг. 59. Сеточное управление тиратроном.

от 0 до 180°. При этом изменяются момент зажигания тиратрона и среднее значение выпрямленного тока I_a (фиг. 59, *а*, *б*, *г*).

При пиковом способе к сетке тиратрона в нужный момент подводится кратковременный пик напряжения, величина которого достаточна для зажигания (фиг. 59, *а*, *в*, *г*).

Ртутный выпрямитель представляет собой ионный прибор, основанный на самостоятельном дуговом разряде в парах ртути. В качестве катода в нем используется жидкая ртуть, имеющая следующие преимущества перед твердыми катодами: а) неограниченную электронную эмиссию; б) неограниченную долговечность, так как испаряющаяся с катода ртуть конденсируется на стенках сосуда и стекает обратно к катоду.

Источником первичных электронов в ртутном выпрямителе является светящееся катодное пятно. Электроны выходят из катода под действием высоких градиентов потенциала у поверхности ртути: 10^5—10^6 *в/см* (автоэлектронная эмиссия), температура же катодного пятна составляет всего 200 — 500° С; температура остальной массы ртути не превышает 50° С.



Фиг. 60. Схема трехфазного стеклянного ртутного выпрямителя.

Баллоны ртутных выпрямителей делаются из стекла или металла. На фиг. 60 приведена принципиальная схема включения трехфазного стеклянного ртутного выпрямителя. Для пуска его служит вспомогательный анод $A_з$. Дуга первоначально возникает между этим анодом и катодом K при наклонении выпрямителя, а затем перебрасывается на рабочие аноды A_p.

Ртутный выпрямитель действует как вентиль, пропуская ток только в одном направлении. Среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе

$$E_{ср} = \frac{\sqrt{2}\,U_2 \sin\frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}},$$

где U_2 — фазное напряжение, подводимое к выпрямителю; m — число фаз выпрямителя.

Полное падение напряжения в ртутном выпрямителе невелико: 16—30 *в*;

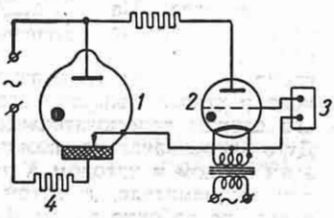
оно не зависит от нагрузки. Поэтому к. п. д. ртутных выпрямителей при низких напряжениях выпрямленного тока невелик, в то время как в мощных установках при высоком напряжении он достигает 0,96—0,97. Напряжение зажигания дуги при нормальных условиях всего лишь на 3—5 *в* превышает напряжение горения (полное падение напряжения в выпрямителе).

Подобно тиратронам ртутные выпрямители могут иметь управляющие сетки и регулировать среднюю величину выпрямленного тока (фиг. 59).

В СССР строятся как стеклянные, так и металлические ртутные выпрямители. Стеклянные — для низкого напряжения на токи до 100 *а* при напряжении до 300 *в*; для высокого напряжения — до 15 *кв* на токи от 6 до 100 *а*. Металлические выпрямители низкого напряжения строятся на токи до 6000 *а* при напряжении до 600—800 *в*; для высокого напряжения — до 11 *кв* на токи до 100 *а*.

Игнитрон (табл. 41) представляет собой разновидность ртутного выпрямителя. Он состоит из стеклянного или металлического сосуда, из которого выкачан воздух, ртутного катода *K* (фиг. 61), графитового анода *A* и зажигателя *З*. Последний делается из полупроводника (карборунда, карбида бора), не смачиваемого ртутью и, погружается в ртуть на

Фиг. 61. Игнитрон.



Фиг. 62. Схема управления игнитроном.

3—5 *мм*. На границе между ним и мениском ртути возникает большой градиент электрического поля, обусловливающий интенсивную автоэлектронную эмиссию; между катодом и зажигателем появляется электрическая дуга. При положительном потенциале анода это вызывает появление дуги в главной цепи. Игнитрон делается одноанодным, и поэтому возникновение главной дуги будет происходить только после появления дуги зажигателя. При

Таблица 41

Параметры некоторых отечественных игнитронов

Тип	Средний ток в *а*	Обратное напряжение в *в*	Ток зажигателя в *а*	Напряжение зажигателя в *в*
И- 20/1500	20	1500	5	80
И- 50/1500	50	1500	5	80
И-100/1000	100	1000	5	80
И-100/5000	100	5000	5	80

изменении фазы зажигания дуги зажигателя будет меняться подобно тиратрону средняя величина тока и напряжения игнитрона.

На фиг. 62 приведена схема, где обозначено: *1* — игнитрон; *2* — тиратрон; *3* — сеточное управление тиратроном; *4* — нагрузка.

Полупроводниковые выпрямители

Полупроводниковые выпрямители служат для выпрямления переменного тока в постоянный. Практическое применение имеют следующие три типа выпрямителей: а) купроксные (меднозакисные); б) селеновые; в) сульфидные (сернисто-медно-магниевые).

Принципиальное устройство всех этих выпрямителей одинаково. Характерным для них является наличие проводника в форме круглой или прямоугольной пластины, на которую нанесен слой полупроводника, покрываемый сверху слоем хорошо проводящего металла для отвода тока (внешний электрод). Между проводником и полупроводником возникает тончайший (толщиной порядка 10^{-5} *см*) непроводящий слой (табл. 42). Проводимости такого устройства в прямом и в обратном направлениях весьма

Таблица 42

Тип вентиля (выпрямителя)	*Схема устройства*	*Направление тока*	
		Прямого	*Обратного*
Купроксный	*Свинец или цинк / Закись меди / Запирающий слой / Медь*	↓	↑
Селеновый	*Железо (никель) / Селен / Запирающий слой / Сплав Bi-Sn-Cd*	↓	↑
Сульфидный	*Железо (никель) / Сернистая медь / Запирающий слой / Магниевый сплав*	↓	↑

различны. Коэффициент добротности полупроводниковых выпрямителей $g = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$ при $U_{пр} = U_{обр}$ достигает 5000—7000.

Сопротивление выпрямителя зависит от нагрузки. Чем меньше плотность тока, тем больше сопротивление вентиля $\frac{dU}{dI}$. Поэтому для данного выпрямителя нельзя чрезмерно уменьшать ток. Напряжение, приложенное к вентилю, во избежание пробоя его не должно превышать указываемой заводом-изготовителем величины. Если требуемая величина выпрямленного тока превышает допустимый ток одной шайбы, прибегают к их параллельному соединению; при необходимости получить выпрямленное напряжение, превышающее допустимое для одной шайбы, прибегают к последовательному соединению шайб.

Таблица 43

Допустимые напряжения и токи полупроводниковых выпрямителей

Тип выпрямителя	Пробивное напряжение в *в*	Длительно допускаемое напряжение в *в*	Оптимальная температура в °С	Допустимая плотность тока при оптимальной температуре в *ма/см²*
Меднозакисный	20—30	8—10	35	35
Селеновый	50—80	20—25	35	20
Сульфидный	8—10	4—5	75	0,5

Таблица 44

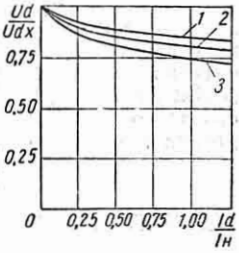
Характеристики выпрямительных схем

Схема по фиг. 64	Наименование схемы	$\frac{E_э}{E_m}$	$\frac{E_0}{E}$
а	Однополупериодное выпрямление	0,318	0,45
б	Двухполупериодное выпрямление с выводом нулевой точки трансформатора (двухфазная схема) *	0,636	0,9
в	Однофазная схема ** . .	0,636	0,9
г	Трехфазная схема с выводом нулевой точки трансформатора	0,827	1,17
д	Трехфазная схема	0,955	1,35

Примечание. В таблице обозначено: $E_э$ — среднее значение выпрямленного напряжения; E_m — амплитуда приложенного к выпрямителю напряжения переменного тока; E — эффективное значение напряжения переменного тока.

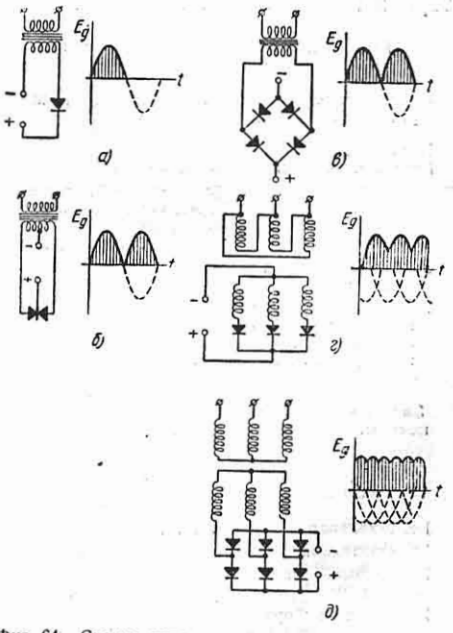
* Плохое использование трансформатора.
** Хорошее использование трансформатора.

Фиг. 63. Внешние характеристики полупроводниковых выпрямителей: *1* — для меднозакисного выпрямителя диаметром 41 *мм*; *2*— для селенового диаметром 45 *мм*; *3* — для сульфидного диаметром 25 *мм*; по оси ординат отложено напряжение в долях напряжения холостого хода выпрямителя.



В табл. 43 приведены данные о пробивном и допустимом напряжении, а также о плотности тока полупроводниковых выпрямителей при оптимальной температуре. При других температурах допустимая плотность тока уменьшается.

На фиг. 63 приведены внешние характеристики выпрямителей.



Фиг. 64. Схемы выпрямления переменного тока.

Наиболее употребительные схемы включения полупроводниковых выпрямителей и кривые выпрямленного напряжения E_g (без учета обратного тока и падения напряжения в выпрямителе и трансформаторе) приведены на фиг. 64, а в табл. 44 — характеристики этих схем.

В СССР наибольшее распространение получили селеновые и купроксные выпрямители, которые применяются для зарядки аккумуляторных батарей, для питания электролитических ванн, для питания цепей управления электромагнитной аппаратуры, для получения постоянного тока при динамическом торможении асинхронных двигателей и т. д.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Электрические измерительные приборы и трансформаторы

В табл. 45 указаны наиболее распространенные электроизмерительные приборы и измеряемые ими величины.

Род тока электроизмерительных приборов

Род тока электроизмерительного прибора	Условный знак рода тока на шкале прибора
Постоянный	⎓
Переменный 50 *гц*	~ Однофазный
	≋ Трехфазный, равномерная нагрузка
	≋ Трехфазный, неравномерная нагрузка
Постоянный и переменный	≂
Переменный однофазный ток с частотой, не равной 50 *гц*, например, 1000 *гц*	~ 1000 Hz

Знаки способа установки и испытательного напряжения для шкал электроизмерительных приборов

Установка прибора	Знак на шкале прибора
Вертикальная	↑
Горизонтальная	→
Наклонная, например, под углом 30°	∠30°
Изоляция прибора испытана, например, на 0,5 *кв*	4 0,5 kV

Классы точности и системы электроизмерительных приборов приведены в табл. 46 и 47.

Таблица 45

Приборы и измеряемые величины

Измеряемая электрическая величина	Наименование прибора	Условный знак единицы измеряемой величины на шкале прибора
Электрический ток	Амперметр Миллиамперметр Гальванометр	A, kA mA G
Напряжение	Вольтметр Милливольтметр Гальванометр	V, kV mV G
Электрическая мощность	Ваттметр Киловаттметр	W kW
Электрическая энергия	Счетчик ватт-часов Счетчик гектоватт-часов Счетчик киловатт-часов	Wh hWh kWh
Количество электричества	Счетчик ампер-часов	Ah
Сдвиг фаз	Фазометр	φ
Частота	Частотомер (герцметр)	f
Электрическое сопротивление	Омметр Мегомметр	Ω MΩ
Емкость	Фарадометр	C

Таблица 46

Классы точности электроизмерительных приборов

Класс прибора	Погрешность в %	Условный знак класса точности на шкале прибора	Применение приборов данного класса
0,1	±0,1	(0.1)	Лабораторные и контрольные
0,2	±0,2	(0.2)	
0,5	±0,5	(0.5)	
1,0	±1,0	(1.0)	Щитовые
1,5	±1,5	(1.5)	
2,5	±2,5	(2.5)	
4,0	±4,0	(4.0)	

Таблица 47

Системы электроизмерительных приборов (ГОСТ 1845-52)

Система	Знак системы на шкале прибора	Для каких приборов используется	Краткая характеристика системы
Магнитоэлектрическая с противодействующей силой		Амперметры, вольтметры, гальванометры	Только для постоянного тока. Равномерная шкала может быть двусторонней. Высокая чувствительность и точность. Применяется для лабораторных, контрольных и технических измерений
То же без противодействующей силы			
Электромагнитная		Амперметры, вольтметры	Для постоянного и переменного тока. Шкала неравномерная. Очень высокая устойчивость к перегрузкам. Класс точности не выше 1-го. Применяется для щитовых приборов переменного тока
Электродинамическая с противодействующей силой		Амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики (преимущественно на постоянном токе), фазометры	Для постоянного и переменного тока. У амперметра и вольтметра начальная часть шкалы неравномерная; у ваттметра шкала обычно равномерная. Применяются для точных измерений на переменном токе. Устойчивость к перегрузкам мала. У неэкранированных приборов на точность показаний сильно влияют внешние магнитные поля. Обычно приборы выполняются на ток 5 *а* для работы с трансформаторами тока
То же без противодействующей силы (логометр)			
То же с противодействующей силой, с магнитным экраном			
То же без противодействующей силы, с магнитным экраном (логометр)			
Ферродинамическая с противодействующей силой		Амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры	Для постоянного и переменного тока. Шкалы, как у электродинамических приборов. Малая чувствительность к внешним магнитным влияниям. Точность невысокая. Применяются преимущественно для технических измерений мощности на переменном токе и как амперметры и вольтметры самопишущих приборов
То же без противодействующей силы (логометр)			
Индукционная		Амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики, фазометры	Для переменного тока. Используется главным образом для счетчиков. Чувствительна к частоте, форме кривой тока, температуре. Точность стрелочных приборов невысокая
Тепловая		Амперметры, вольтметры	Для постоянного и переменного тока. Точность очень низкая, а собственное потребление мощности велико. Применяются для ориентировочных измерений силы тока при высокой частоте
Термоэлектрическая		Амперметры, вольтметры	Для переменного тока промышленной, звуковой и высокой частот

Продолжение табл. 47

Система	Знак системы на шкале прибора	Для каких приборов используется	Краткая характеристика системы
Электростатическая		Вольтметры	Для постоянного и переменного тока. Собственное потребление мощности практически равно нулю. Применяются для непосредственного измерения высоких напряжений и напряжений в маломощных цепях
Вибрационная		Частотомеры (герцметры)	Применяется для частот 15—1500 *гц*. Точность измерения около 0,25 *гц*
Выпрямительная (детекторная)		Амперметры, вольтметры, частотомеры, фарадометры	Для переменного тока промышленной, звуковых и высоких частот

Шунты и добавочные сопротивления разделяются на классы 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0.

По условиям эксплуатации приборы, шунты и добавочные сопротивления разделяются на три группы:

Группа	Температура окружающего воздуха в °С	Относительная влажность в %
А	От +10 до +35	До 80
Б	„ −20 „ +50	„ 80
В	„ −40 „ +60	„ 98

Измерительные трансформаторы служат для увеличения пределов измерения электроизмерительных приборов переменного тока и для электрического отделения цепи высокого напряжения от измерительной цепи низкого напряжения.

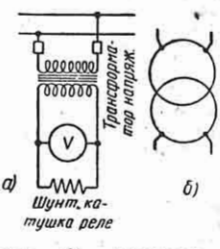
Измерительные трансформаторы разделяются на трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.

Трансформаторы тока служат для преобразования измеряемого тока большой величины в ток малой величины и предназначаются для включения амперметров, токовых катушек ваттметров, счетчиков, реле. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в цепь измеряемого тока; вторичная обмотка замыкается на прибор, катушку реле или закорачивается, так как при разомкнутой вторичной обмотке напряжение на ее концах становится недопустимо большим. На фиг. 65 показано включение амперметра и катушки реле. Все аппараты, включаемые во вторичную цепь трансформаторов тока, соединяются последовательно.

Трансформаторы тока строятся на номинальные первичные силы тока от 5 до 15 000 *а*. Номинальная сила тока вторичной цепи всегда равна 5 *а*.

В зависимости от токовой погрешности при номинальном токе трансформаторы тока разделяются на следующие классы точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Класс

Фиг. 65. Включение приборов через трансформатор тока.



Фиг. 66. Включение приборов через трансформатор напряжения.

точности указывает токовую погрешность в процентах. Класс точности трансформаторов тока меняется в зависимости от величины нагрузки вторичной цепи.

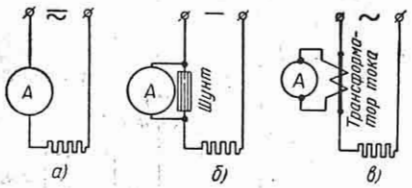
Трансформаторы напряжения служат для трансформации измеряемого высокого напряжения в низкое. При номинальных условиях вторичное напряжение равно 100 *в*. Трансформаторы напряжения применяются для включения вольтметров, шунтовых обмоток счетчиков, ваттметров, катушек реле (фиг. 66, *а*). На фиг. 66, *б* показан другой графи-

ческий символ трансформатора напряжения.

В зависимости от процентной погрешности в величине вторичного напряжения трансформаторы напряжения делятся на три класса точности: 0,5; 1; 3. Класс точности зависит от величины нагрузки вторичной цепи.

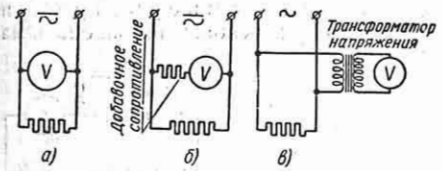
Методы измерений

Измерение величины тока производится амперметрами по одной из схем фиг. 67. Включение амперметра по схеме фиг. 67, *а* производится при постоянном токе небольшой величины и переменном токе также небольшой величины и низкого напряжения; схема фиг. 67, *б* (включение через шунт) применяется при постоянном токе значительной величины. Шунты строятся согласно ГОСТ 3043-53. Схема фиг. 67, *в* используется при переменном токе высокого напряжения или большой величины.



Фиг. 67. Схемы включения амперметров.

Измерение напряжения производится вольтметром по одной из схем фиг. 68. По схеме фиг. 68, *а* вольтметр включается при низком напряжении постоянного и переменного тока. Для расширения пределов измерения применяется добавочное сопротивление, включаемое по схеме фиг. 68, *б*. Добавочные сопротивления строятся по ГОСТ 3043-53. При высоком напряжении переменного тока вольтметр включается через трансформатор напряжения по схеме фиг. 68, *в*.



Фиг. 68. Схемы включения вольтметров.

Измерение активной мощности производится следующими способами.

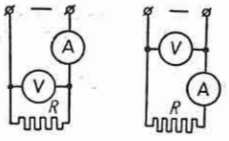
1. При постоянном токе мощность, потребляемая нагрузкой R, простейшим способом может быть измерена при помощи амперметра и вольтметра (фиг. 69). Она равна произведению показаний обоих приборов и будет выражена в ваттах. Однако этот способ не совсем точен. При соединении приборов по схеме фиг. 69, *а* замеряется мощность

$$P = P_{нагр} + P_V.$$

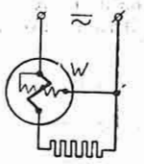
При соединении приборов по схеме фиг. 69, *б* замеряется мощность

$$P = P_{нагр} + P_A.$$

Если сопротивление R мало по сравнению с сопротивлением вольтметра, применяют схему фиг. 69, *а*; если R соизмеримо с сопротивлением вольтметра, применяют схему фиг. 69, *б*.



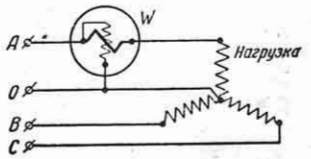
Фиг. 69. Схемы измерения мощности амперметром и вольтметром.



Фиг. 70. Схема включения ваттметра в однофазную цепь.

2. Схема фиг. 70, где для измерения мощности используется ваттметр, применяется для постоянного и однофазного переменного токов.

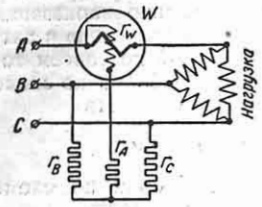
3. Измерение мощности трехфазного тока с нулевым проводом при равномерной нагрузке фаз может быть произведено одним ваттметром, включенным по схеме фиг. 71. Его показания должны быть умножены на 3.



Фиг. 71. Схема включения однофазного ваттметра в трехфазную цепь при наличии нулевого провода.

4. Если при трехфазном токе и равномерной нагрузке нулевая точка отсутствует или недоступна, может быть

создана искусственная нулевая точка (фиг. 72) и измерение мощности произведено одним ваттметром, показания которого умножаются на 3. Сопротивления r_B и r_C должны быть равны между

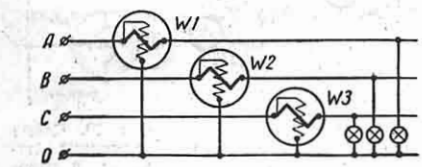


Фиг. 72. Схема включения однофазного ваттметра в трехфазную цепь с искусственной нулевой точкой.

собой; сопротивление r_A включается последовательно с шунтовой обмоткой ваттметра и подсчитывается по формуле

$$r_A = r_B - r_W = r_C - r_W.$$

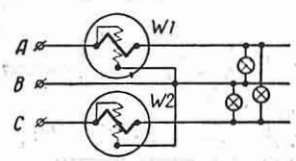
5. При трехфазном токе с нулевым проводом и неравномерной нагрузке фаз измерение мощности может производиться по схеме фиг. 73. Показания



Фиг. 73. Схема измерения мощности трехфазной цепи тремя ваттметрами.

всех трех ваттметров W должны складываться.

6. Мощность трехфазной цепи при нагрузке любого характера и отсутствии нулевой точки может быть измерена при помощи двух ваттметров, включенных по схеме Арона (фиг. 74). При углах сдвига фаз $\varphi < 60°$ мощности обоих

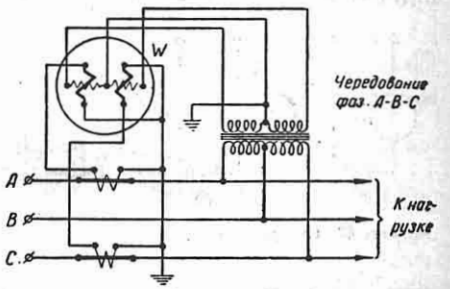


Фиг. 74. Непосредственное включение двух ваттметров по схеме Арона.

ваттметров складываются (стрелки обоих приборов отклоняются в одну сторону); если $\varphi > 60°$, мощность второго ваттметра отрицательна (стрелка его отклоняется в обратную сторону). Так как ваттметр имеет одностороннюю шкалу, для выявления показаний второго прибора переключается одна из его обмоток. Показание второго ваттметра нужно вычесть из показаний первого.

Оба ваттметра по схеме Арона могут быть объединены в один однострелочный двухэлементный ваттметр.

7. При измерении мощности цепей переменного тока высокого напряжения включение обмоток ваттметров производится через измерительные трансформаторы. Например, схема Арона при высоком напряжении будет выглядеть так, как это показано на фиг. 75.



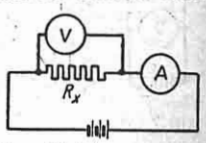
Фиг. 75. Включение ваттметра по схеме Арона через измерительные трансформаторы.

Измерение активной энергии производится при помощи счетчиков, схемы включения которых ничем не отличаются от соответствующих схем включения ваттметров, приведенных на фиг. 70—75.

Измерение сопротивлений осуществляется следующими способами.

1. Метод амперметра и вольтметра основан на законе Ома (фиг. 76)

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{r_V}}.$$



Фиг. 76. Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра.

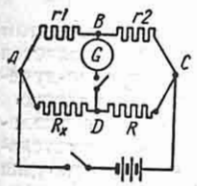
где R_x — измеряемое сопротивление в *ом*; U — показание вольтметра в *в*; I — показание амперметра в *а*; r_V — сопротивление вольтметра.

2. Метод моста Уитстона (фиг. 77). Если $\frac{r1}{r2} = \frac{R_x}{R}$, то напряжение между точками B и D равно нулю, и

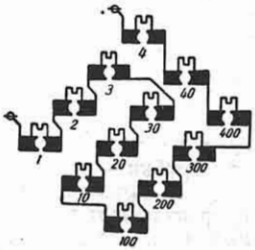
гальванометр G не будет давать отклонений. Нулевого показания гальванометра добиваются соответствующим подбором сопротивлений $r1$, $r2$, R и тогда величину сопротивления R_x находят по формуле

$$R_x = R\frac{r1}{r2}.$$

Подбор сопротивлений $r1$, $r2$, R производится обычно посредством магазинов со-



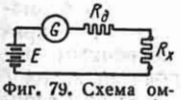
Фиг. 77. Измерение сопротивления методом моста Уитстона.



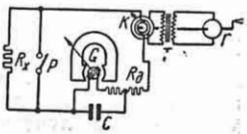
Фиг. 78. Схема магазина сопротивлений.

противлений, представляющих собой набор калиброванных сопротивлений, каждое из которых может быть выключено из цепи при помощи конического штепселя. На фиг. 78 представлена схема штепсельного разномерного магазина сопротивлений.

3. Измерение сопротивлений может производиться при помощи *омметров* с непосредственным отсчетом. Простейшая схема омметра с сухой батареей приведена на фиг. 79. Омметр со-



Фиг. 79. Схема омметра с сухой батареей.



Фиг. 80. Схема омметра с индуктором.

стоит из источника тока постоянного напряжения E и чувствительного гальванометра G с добавочным сопротивлением $R_д$. Часто вместо сухой батареи в качестве источника тока применяют вращаемый от руки маленький однофазный генератор (индуктор). Схема омметра с индуктором дана на фиг. 80. Здесь $Г$ — индуктор; T — трансформатор, повышающий напряжение индуктора до 500—1000 $в$; K — коллектор, выпрямляющий получаемое напряжение однофазного тока; C — конденсатор, сглаживающий пульсации выпрямленного напряжения; G — гальванометр.

Омметры, предназначенные для измерения сопротивления изоляции, называются меггерами.

Осциллографы

Осциллограф — прибор, служащий для записи кривых мгновенных значений электрических токов и напряжений быстро протекающих переходных процессов как периодических, так и непериодических. Осциллографом может быть записано изменение любой величины, например скорости, мощности, вращающего момента и т. д., при условии, что эта величина будет трансформирована в электрический ток или напряжение. Потребность в записи быстро протекающих процессов имеется почти во всех отраслях техники, вследствие чего осциллограф используется во многих научно-исследовательских институтах и лабораториях.

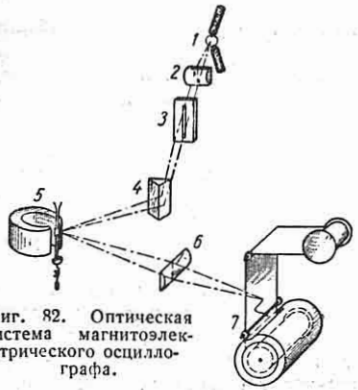
В современной практике находят применение инерционные магнитоэлектрические и безинерционные электронные осциллографы.

Магнитоэлектрический осциллограф. Для того чтобы измерительный орган осциллографа успевал следовать за быстрыми изменениями измеряемой величины, он должен обладать минимальной инерцией. Измерительным органом магнитоэлектрического осциллографа является вибратор или шлейф, представляющий собой магнитоэлектрический гальванометр с очень легкой подвижной системой. Его устройство представлено на фиг. 81. Измеряемый ток проходит по проволочной петле *1*, на которой укреплено легкое зеркальце *3*. Проволочная петля, натягиваемая пружиной *2*, помещена в поле постоянного магнита *4*. При отсутствии тока в петле плоскость зеркальца примерно параллельна направлению линий магнитного поля. При прохождении тока по петле зеркальце стремится повернуться и занять положение, перпендикулярное направлению линий магнитного поля. Вращающий момент, действующий

Фиг. 81. Шлейф магнитоэлектрического осциллографа.

на зеркальце, пропорционален току, протекающему по петле.

Оптическая система магнитоэлектрического осциллографа изображена на фиг. 82. Световой поток мощного источника света—электрической дуги *1*—фокусируется при помощи собирательной линзы *2* в пределах узкой вертикальной



Фиг. 82. Оптическая система магнитоэлектрического осциллографа.

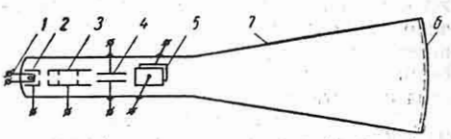
щели диафрагмы *3*, откуда световой поток, отклоняясь трехгранной призмой *4*, попадает на зеркальце вибратора *5*. Отразившись от зеркальца под некоторым углом, пучок света проходит линзу *6* и фокусируется ею на фотографическую бумагу *7* в виде светлой точки — „зайчика". При протекании по петле вибратора меняющегося тока „зайчик" прочерчивает на фотобумаге прямую линию, тем более длинную, чем больше размах колебаний зеркальца. Если перемещать бумагу с равномерной скоростью, „зайчик" вычертит на бумаге кривую, ординаты которой пропорциональны силе протекающего по петле вибратора тока. Барабан, на который намотана фотобумага, приводится во вращение маленьким электродвигателем.

Петля вибратора рассчитывается на силу тока не свыше 0,1 *а*; для измерения бо́льших токов вибраторы присоединяются параллельно шунтам. Для измерения напряжений петля вибратора включается подобно вольтметру последовательно с добавочным сопротивлением. Для возможности одновременной записи нескольких быстро меняющихся величин, например, скорости двигателя, напряжения на его якоре, силы тока якоря, напряжения и тока возбуждения, осциллографы снабжаются несколькими вибраторами (шлейфами) — от 3 до 12.

Магнитоэлектрические осциллографы позволяют также визуально наблюдать кривые периодических процессов, для чего осциллографы снабжаются зеркальным вращающимся многогранником и матовым экраном.

Электронный (катодный) осциллограф. В электронном осциллографе в качестве „подвижной системы" используется практически безинерционный узкий пучок электронов — электронный луч. Вследствие этого катодные осциллографы применяются для наблюдения и записи весьма быстро изменяющихся величин или процессов.

Основным и важнейшим элементом электронного осциллографа является одна из модификаций электронно-лучевой трубки — электронный осциллоскоп. Помимо трубки электронный осциллограф включает в себя ряд вспомогательных устройств, как-то: устройство для развертки по времени, для фотографирования, для получения анодного высокого напряжения и т. д. На фиг. 83 приведена схема устройства электронного осциллоскопа, который представляет собой стеклянный баллон *7* с несколь-



Фиг. 83. Электронно-лучевая трубка — осциллоскоп.

кими электродами *1—5* и флюоресцирующим экраном *6*. Электронный осциллоскоп может иметь катод либо прямого накала, либо с косвенным подогревом. На фиг. 83 показан катод *1* прямого накала. В отличие от электронных ламп в лучевых трубках катод должен давать эмиссию преимущественно в направлении электронного луча, т. е. к экрану *6*. Для фокусирования электронного потока служат цилиндр *2* и аноды *3*. Цилиндр *2* находится под небольшим отрицательным потенциалом, вследствие чего эмитированные катодом электроны оформляются в электронный луч. Далее, под действием электрического поля анода *3*, имеющего сложную форму, электроны движутся к аноду и, получив большую скорость и оформившись в узкий электронный луч, устремляются к экрану *6*. Устройства, фокусирующие электрон-

ный поток, называют иногда электронной пушкой.

Если пластины *4* и *5* не заряжены, на экране получается изображение светящейся точки. Если к пластинам *4* приложить напряжение, электронный луч отклонится вверх или вниз на больший или меньший угол в зависимости от знака и величины этого напряжения. На экране при этом получится изображение вертикальной линии. Если, далее, к пластинам *5* приложить напряжение, изменяющееся по линейному закону в функции времени, это повлечет отклонение луча в горизонтальной плоскости с равномерной скоростью, и на экране получится развернутая по времени кривая изменения величины напряжения, приложенного к пластинам *4*.

Для одновременного наблюдения или записи нескольких величин электронные осциллоскопы устраиваются с несколькими пушками (до четырех).

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Арутюнов В. О. и Валицкий В. П., Электроизмерительные приборы, Энергоиздат, 1949.
2. БТИ МПСС, Сводный каталог на химические источники тока, 1950.
3. Булгаков А. А., Электронные устройства автоматического управления, Энергоиздат, 1951.
4. Власов В. Ф., Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1949.
5. Вологдин В., Выпрямители, ОНТИ, 1936.
6. Горелик А. Л.. Промышленная электроника, Энергоиздат, 1951.
7. Дорфман Я. Г. и Фриш С. Э. (ред.), Сборник физических констант. ОНТИ, 1937.
8. Касаткин А. С., Перекалин М. А., Сергеев П. С., Общая электротехника, Энергоиздат, 1953.
9. Касаткин А. С., Электрические измерения, Энергоиздат, 1946.
10. Каталоги МЭП.
11. Комар В. Г., Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления, Энергоиздат, 1952.
12. Казаринов И. А., Селеновые выпрямители для предприятий связи, Связьиздат, 1952.
13. Каганов И. Л., Электронные и ионные преобразователи, Энергоиздат, 1950.
14. Левинзон А. З., Полупроводниковые выпрямители, Энергоиздат, 1948.
15. Михайлов М. М., Электроматериаловедение, Энергоиздат, 1953.
16. Тягунов Г. А., Электровакуумные приборы, Энергоиздат, 1949.
17. Электротехнический справочник, Энергоиздат, 1952.
18. Каталог МПСС на электронные лампы и другие электронные приборы, т. II.

ГЛАВА XIII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Классификация электрических машин по роду тока. По роду тока электрические машины подразделяются на:

машины постоянного тока с параллельным возбуждением (шунтовые), *с последовательным* возбуждением (сериесные), со *смешанным* возбуждением (компаундные) и др.;

трехфазные машины переменного тока синхронные, асинхронные и др.;

однофазные машины переменного тока.

Классификация электрических машин по их функциям. *Электрическим генератором* называется вращающаяся электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую.

Электродвигателем называется вращающаяся электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую.

Двигатель-генератором называется агрегат, состоящий из двух или нескольких механически связанных электрических машин, служащий для преобразования переменного тока в постоянный или обратно.

Электромашинным усилителем называется специальный генератор постоянного тока, служащий для значительного усиления мощности, подаваемой на входную цепь его (обмотку возбуждения) и применяемый для целей регулирования и управления.

Вольтодобавочной машиной называется генератор, включенный последовательно в какую-либо цепь для изменения напряжения на выходе ее.

Преобразователем частоты называется машина (или агрегат из двух машин), которая превращает электрическую энергию переменного тока одной частоты в электрическую энергию переменного тока другой частоты с изменением или без изменения числа фаз и напряжения.

Синхронным или асинхронным компенсатором называется машина, предназначенная для питания реактивной мощностью системы, к которой она присоединена.

Классификация электродвигателей по скоростным характеристикам. Двигателями с *постоянной скоростью вращения* называются двигатели, у которых скорость вращения не зависит от нагрузки (синхронные двигатели).

Двигателями *с шунтовой характеристикой* называются такие двигатели, у которых скорость вращения при изменении нагрузки изменяется незначительно (например, шунтовые двигатели постоянного тока, асинхронные двигатели).

Двигателями с *сериесной характеристикой* называются такие двигатели, скорость вращения которых в сильной степени зависит от нагрузки, причем увеличение нагрузки сопровождается снижением скорости (например, двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением).

Двигателями с *несколькими ступенями скорости* (многоскоростными) называются такие двигатели, скорость вращения которых можно изменять ступенями путем изменения числа полюсов (асинхронные короткозамкнутые двигатели со специальной обмоткой в статоре).

Двигателями с *регулировкой скорости* называются двигатели, скорость вращения которых для одной и той же нагрузки можно изменять в некоторых пределах (например, двигатели постоянного тока параллельного возбуждения).

Классификация машин по системам охлаждения. Машиной с *естественным охлаждением* называется такая машина, которая не имеет никаких

специальных приспособлений для охлаждения.

Машиной с *самовентиляцией* называется такая машина, охлаждение которой достигается вентилятором или каким-нибудь другим специальным приспособлением, составляющим с вращающейся частью машины одно целое.

Машиной с *посторонним охлаждением* называется такая машина, к которой охлаждающая среда (газообразная или жидкая) подается специальным устройством (вентилятором или насосом), работающим независимо от машины.

Классификация машин по способу защиты от действия окружающей среды. *Открытой машиной* называется такая машина, в которой вращающиеся и токоведущие части не имеют специальных защитных приспособлений. Они устанавливаются в сухих помещениях без пыли, грязи и газов.

а) *Защищенной машиной* называется такая, у которой обмотки и другие части, находящиеся под напряжением или в движении, защищены от случайного прикосновения или проникновения внутрь машины посторонних тел, но таким образом, что свободный обмен воздуха между машиной и окружающей средой не нарушен. Против пыли, влажности и газов, содержащихся в воздухе, машины этого рода не защищены.

б) *Защищенной от попадания капель сверху* (капежа) машиной называется такая, которая, кроме защиты согласно п. „а", имеет приспособление, исключающее возможность попадания в машину жидкости и грязи сверху.

в) *Защищенной от дождя и брызг* называется такая машина, которая, кроме защиты согласно п. „а", имеет приспособления, предохраняющие от проникновения внутрь машины водяных капель и струй любого направления.

Закрытой машиной называется такая, которая, не будучи абсолютно герметической, не имеет никаких других отверстий, кроме отверстий для болтов, скрепляющих отдельные механические части, и для вывода проводов или же имеет только такие отверстия, которые защищены крышками, препятствующими проникновению воздуха из машины в окружающее пространство и обратно. Закрытые машины могут работать на открытом воздухе.

Закрытой вентилируемой машиной называется закрытая машина с независимым охлаждением. Охлаждающая среда подводится посредством труб или других аналогичных устройств. Эти машины предназначены для установки в пыльных и влажных помещениях.

Герметически закрытой машиной называется машина, имеющая плотно закрытый корпус, не допускающий проникновения влаги внутрь машины при полном погружении ее в воду в течение 4 час.

Эти машины предназначены для установки в особо сырых помещениях с парами и едкими газами.

Машиной с защитой против взрыва (взрывобезопасной) называется машина, снабженная специальным кожухом, который может противостоять без повреждения взрывам газа внутри машины и не передает пламени воспламенившегося газа вне ее и наоборот.

Машиной с защитной противовзрывной оболочкой для колец называется такая машина, в которой кольца и щетки заключены в специальную оболочку, могущую противостоять взрыву газов внутри нее и препятствующую выбиванию пламени наружу.

Противосыростная изоляция применяется у машин, устанавливаемых во влажной среде.

В табл. 1 приведены данные о снижении мощности асинхронных двигателей в зависимости от их исполнения; мощность двигателя в открытом исполнении принята за единицу.

Таблица 1

Снижение мощности асинхронных двигателей в зависимости от исполнения их

Число оборотов в минуту	Вентилируемый				Совершенно закрытый	
	Защищенный		Закрытый			
	до 100 *квт*	св. 100 до 1000 *квт*	до 100 *квт*	св. 100 до 1000 *квт*	до 100 *квт*	св. 100 до 1000 *квт*
3000	1	0,9	0,85	0,85	0,4	—
1500	1	0,9	0,85	0,80	0,4	0,25
1000	1	0,85	0,85	0,75	0,45	0,30
750	0,95	0,85	0,80	0,75	0,50	0,45
500 и ниже	0,95	0,80	0,80	0,70	0,50	0,45

Номинальные значения величин. *Номинальным режимом работы* электрической машины называется режим

работы при условиях, указанных на заводском щитке машины.

Номинальный режим работы машины характеризуется номинальными значениями мощности, напряжения, тока, коэффициента мощности ($\cos\varphi$), скорости вращения, частоты, тока возбуждения и т. д.

Номинальной мощностью электрической машины называется мощность, которую машина должна отдавать в номинальном режиме.

Номинальная мощность генератора постоянного тока определяется на зажимах машины и выражается в ваттах (*вт*), киловаттах (*квт*) или мегаваттах (*мгвт*).

Номинальная мощность генератора переменного тока определяется на зажимах машины и выражается в вольтамперах (*ва*), киловольтамперах (*ква*) или мегавольтамперах (*мгва*).

Номинальная мощность электродвигателя определяется на его валу и выражается в ваттах или киловаттах.

Номинальным напряжением называется напряжение, указанное на щитке машины, которое машина должна развивать на своих зажимах в номинальном режиме (для генераторов) или при котором она должна работать (для двигателей).

Данные относительно напряжений для машин переменного тока относятся к действующим (эффективным) значениям напряжения.

Под напряжением трехфазной машины понимается междуфазовое (линейное) напряжение.

Номинальные напряжения электрических машин. Согласно ГОСТ 721-41 установлены стандартные номинальные напряжения приемников электрической энергии, генераторов и трансформаторов, приведенные в табл. 2.

Номинальный коэффициент мощности ($\cos\varphi$) представляет отношение номинального значения активной мощности на зажимах машины к номинальному значению кажущейся мощности.

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) машины — отношение полезной (отдаваемой) мощности к затрачиваемой (подводимой) мощности.

Номинальный момент электродвигателя

$$M_н = 975\frac{P_н}{n_н}\ кГм,$$

где $P_н$ — номинальная мощность двигателя в *квт*; $n_н$ — номинальная скорость вращения в об/мин.

Конструктивные исполнения электродвигателей. По конструкции двигатели разделяются на:

а) *нормальные* с горизонтальным расположением вала для крепления на лапах к полу; двигатели можно крепить также к потолку или к вертикальной стене при

Таблица 2

Номинальные напряжения в вольтах приемников электрической энергии, генераторов и трансформаторов

Приемники электрической энергии			Генераторы		Трансформаторы			
					трехфазного тока 50 *гц* (междуфазовое)		однофазного тока 50 *гц*	
постоянного тока	трехфазного тока 50 *гц*		постоянного тока	трехфазного тока 50 *гц* (междуфазовое)	Первичные обмотки	Вторичные обмотки	Первичные обмотки	Вторичные обмотки
	междуфазовое	фазовое						
6	—	—	6	—	—	—	—	—
12	—	—	12	—	—	—	—	—
24	—	—	24	—	—	—	—	12
—	—	—	—	36	—	—	—	—
48	—	—	48	—	—	—	—	36
110	—	—	115	—	—	—	—	—
—	127	—	—	133	127	133	127	133
220	220	127	230	230	220	230	220	230
—	380	220	—	400	380	400	380	—
440	—	—	460	—	—	—	—	—
—	500	—	—	525	500	525	500	—
	3 000	—	—	3 150	3 000 и 3 150	3 150 и 3 300	—	—
	6 000	—	—	6 300	6 000 „ 6 300	6 300 „ 6 600	—	—
	10 000	—	—	10 500	10 000 „ 10 500	10 500 „ 11 000	—	—

отсутствии жидкой смазки или при наличии подшипников, не допускающих вытекания смазки;

б) *фланцевые*;

в) *встроенные* внутрь машины;

г) с вертикальным расположением вала;

д) двигатели, представляющие собой *часть рабочей машины* (например, двигатели с дуговым статором).

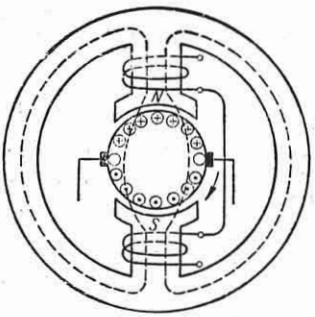
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Общая характеристика. *Двигатели* постоянного тока допускают экономичную и плавную регулировку скорости в широких пределах, особенно в системе генератор—двигатель (схема Леонарда), плавный пуск, торможение и реверс, поддержание постоянства заданных параметров (при применении электромашинных усилителей).

Генераторы постоянного тока применяются: 1) для питания двигателей постоянного тока в стационарных промышленных установках и нестационарных (например, на тепловозах); 2) в качестве возбудителей синхронных генераторов и синхронных двигателей; 3) для зарядки аккумуляторных батарей; 4) для электролиза и гальванопластики; 5) в авто- и авиатранспорте; 6) в установках проводной и радиосвязи; 7) в качестве электромашинных усилителей для непрерывного регулирования и управления приводов постоянного тока.

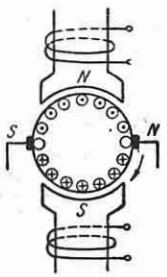
Недостатки привода постоянного тока — необходимость преобразовательной установки для преобразования трехфазного переменного тока в постоянный ток, более высокая стоимость машин постоянного тока, более сложный уход за ними ввиду наличия коллектора и щеточного аппарата.

Принцип действия машины постоянного тока. Генератор постоянного тока. При протекании тока в обмотке возбуждения последняя создает магнитный поток, силовые линии которого замыкаются через тело полюсов, станину, воздушный зазор и якорь (фиг. 1). При вращении якоря в проводниках его по закону электромагнитной индукции наводится э. д. с. Отдельные проводники обмотки якоря соединяются таким образом, что наведенные в них э. д. с. складываются. В каждом проводнике наводится переменная э. д. с. (знак э. д. с. меняется при прохождении проводника через нейтраль, под щетками). Для выпрямления э. д. с. и тока во внешней цепи служит *коллектор* с наложенными на него щетками.



Фиг. 1.

Двигатель постоянного тока. Когда постоянный ток протекает через обмотку возбуждения и обмотку якоря, каждая обмотка создает магнитное поле и может рассматриваться как электромагнит. Якорь стремится повернуться таким образом, чтобы северный полюс его совпал с южным полюсом обмотки возбуждения (фиг. 2). Но обмотка якоря устроена так, что независимо от положения якоря положение полюсов его в пространстве остается неизменным (оно определяется положением неподвижных щеток). Вследствие этого вращение якоря будет происходить непрерывно.



Фиг. 2.

Всякая электрическая машина является *обратимой*, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

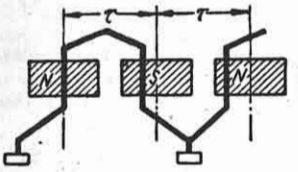
Устройство. Статор (станина) — неподвижная часть машины. На статоре расположены главные полюсы, на которых помещается *обмотка возбуждения*, служащая для создания магнитного потока. Главные полюсы обычно составляются из листов электротехнической стали толщиной 0,5—1 *мм*. Станина статора — стальная (литая или сварная) либо чугунная.

Якорь — вращающаяся часть машины. Сердечник якоря собирается из листов электротехнической стали 0,5 *мм*.

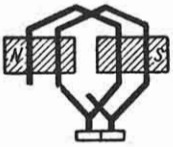
покрытых лаком или оклеенных бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи.

Обмотка якоря закладывается в пазы, проштампованные у внешней поверхности якоря, и закрепляется либо клиньями, либо проволочными стальными бандажами. Обмотка якоря является замкнутой на себя барабанной обмоткой и выполняется в виде *петлевой* или *волновой* обмотки.

Волновая обмотка характеризуется обходом окружности якоря в одном направлении (фиг. 3).



Фиг. 3.



Фиг. 4.

Петлевая обмотка характеризуется возвратно-поступательным обходом (фиг. 4).

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}.$$

Ему соответствует 180 электрических градусов. Здесь p — число пар полюсов; D — диаметр якоря.

Коллектор и щеточный аппарат служат для соединения обмотки якоря с внешней цепью и для выпрямления текущего по обмотке якоря переменного тока в постоянный. Коллектор состоит из пластин твердотянутой электролитической меди трапециевидной формы, разделенных прокладками из миканита. К пластинам присоединяются витки якоря (см. фиг. 3 и 4).

Добавочные полюсы прикрепляются к станине между главными полюсами (в нейтральной зоне) и предназначены для получения безискровой коммутации. На добавочные полюсы надевается обмотка, соединенная последовательно с обмоткой якоря.

Обозначение выводов обмоток. Согласно ГОСТ 183-41 установлены обозначения выводов обмоток машины постоянного тока, приведенные в табл. 3.

Коммутация — явление, заключающееся в том, что при вращении якоря витки обмотки якоря периодически замыкаются накоротко щетками, причем ток в витках меняет направление на обратное. Коммутация может сопровождаться сильным искрением под щетками, в особенности при больших токах. Для улучшения коммутации служат добавочные полюсы (см. выше).

Таблица 3

Обозначение выводов обмоток

Наименование обмоток	Обозначения	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Компенсационная обмотка	К1	К2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Сериесная обмотка . .	С1	С2
Шунтовая „ . .	Ш1	Ш2
Пусковая „ . .	П1	П2
Уравнительный провод и уравнительные обмотки	У1	У2
Обмотки особого назначения	О1	О2

Машина постоянного тока должна работать практически без искрения под щетками и без повреждения коллектора и щеток при изменении нагрузки вплоть до номинальной величины, а также без опасного искрения при кратковременных перегрузках.

Реакция якоря. При протекании тока по обмотке якоря последняя создает магнитный поток, который складывается с главным потоком, создаваемым обмоткой возбуждения. Влияние потока якоря на характеристики машины носит общее название *реакции якоря*. В генераторах реакция якоря вызывает дополнительное падение напряжения с увеличением нагрузки; в двигателях реакция якоря несколько снижает уменьшение скорости вращения, вызываемое падением напряжения в цепи якоря. Реакция якоря неблагоприятно сказывается на коммутации. Поэтому в крупных машинах постоянного тока устраивается *компенсационная* обмотка. Последняя закладывается в пазах полюсных башмаков и представляет зеркальное изображение обмотки якоря. Обе обмотки соединяются последовательно, причем магнитные потоки, создаваемые ими, взаимно уничтожаются.

Основные соотношения. Обозначения: Ф — магнитный поток в *в·сек*; создаваемый обмоткой возбуждения,

n — скорость вращения якоря в об/мин; p — число пар полюсов машины; N — число проводов якоря; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря; E — э. д. с. в *в*, наведенная потоком возбуждения в обмотке якоря; U — напряжение в *в* на щетках якоря; I — ток в *а* якоря; R — сопротивление в *ом* цепи якоря, включая и внешние сопротивления; M — электромагнитный момент в *кГм*, создаваемый взаимодействием потока возбуждения и тока якоря.

Э. д. с. обмотки якоря

$$E = k_e \Phi n \text{ в}, \qquad (1)$$

где $k_e = \frac{pN}{60a}$ — постоянный для данной машины коэффициент.

Из этой формулы следует, что э. д. с. якоря пропорциональна произведению величины потока возбуждения на скорость вращения.

Уравнение напряжений для цепи якоря двигателя

$$U = E + IR \text{ в}. \qquad (2)$$

Формула тока

$$I = \frac{U - E}{R} \text{ а}. \qquad (3)$$

В двигательном режиме машины $U > E$, и ток совпадает по направлению с напряжением.

В генераторном режиме $U < E$, ток совпадает по направлению с э. д. с. и направлен против приложенного напряжения.

Мощность, превращаемая двигателем в механическую или генератором в электрическую, равна

$$P_i = EI \text{ вт}. \qquad (4)$$

Мощность на зажимах машины

$$P = UI \text{ вт}.$$

Момент, развиваемый машиной постоянного тока, определяется выражением

$$M = k_m I \Phi \text{ кГм}, \qquad (5)$$

т. е. электромагнитный момент пропорционален произведению тока якоря на поток возбуждения;

$$k_m = \frac{p}{2\pi \cdot 9{,}81} \cdot \frac{N}{a}.$$

Скорость вращения двигателя [формулы (1) и (2)]

$$n = \frac{E}{k_e \Phi} = \frac{U - IR}{k_e \Phi} \approx \frac{U}{k_e \Phi} \text{ об/мин}, \qquad (6)$$

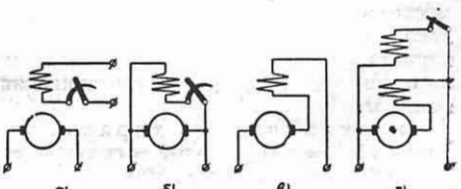
так как в рабочем режиме $IR \ll U$.

Следовательно, скорость вращения двигателя приблизительно пропорциональна напряжению на якоре и обратно пропорциональна величине потока возбуждения.

Схемы машин постоянного тока. Схема включения обмотки возбуждения машины постоянного тока определяет, в какой зависимости от тока нагрузки (тока якоря) находятся ток возбуждения или ампервитки возбуждения. Эта зависимость определяет основные эксплуатационные характеристики машины как в генераторном, так и в двигательном режиме.

Основные схемы питания обмотки возбуждения следующие (фиг. 5).

Машина с независимым возбуждением (фиг. 5, *а*). Обмотка возбуждения питается от постороннего источника напряжения (например, аккумуляторной батареи). В этой машине



Фиг. 5.

величина ампервитков возбуждения не зависит от режима машины (скорости, нагрузки и т. д.).

Машина с параллельным возбуждением (шунтовая машина, фиг. 5, *б*) отличается тем, что здесь обмотка возбуждения приключается к зажимам якоря. В генераторном режиме это вызывает более сильную зависимость напряжения от нагрузки, чем у машин с независимым возбуждением. Работа шунтовой машины в двигательном режиме при постоянном напряжении источника питания не отличается от работы машины с независимым возбуждением.

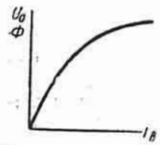
Машина с последовательным возбуждением (сериесная машина, фиг. 5, *в*). Обмотка возбуждения

обтекается током, равным (или пропорциональным) току якоря. Ампервитки возбуждения сильно зависят от нагрузки.

Машины с последовательным возбуждением применяются, главным образом, в качестве двигателей.

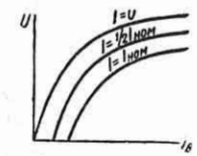
Машина со смешанным возбуждением (компаундная машина, фиг. 5, *г*) имеет на полюсах две обмотки возбуждения — параллельную и последовательную. Характер влияния нагрузки на суммарные ампервитки возбуждения определяется соотношением амперитков обеих обмоток.

Характеристики генераторов постоянного тока. Характеристика холостого хода (фиг. 6) представляет зависимость напряжения U_0 генератора при холостом его ходе ($I = 0$) от тока возбуждения $i_в$ при постоянной скорости вращения $n = \text{const}$. При этих условиях $U_0 = E$. Вследствие пропорциональности Ф и E [формула (1)] эта характеристика дает в то же время зависимость потока Ф главных полюсов от тока возбуждения $i_в$. Следовательно, характеристика холостого хода является в то же время кривой намагничивания машины.



Фиг. 6.

Нагрузочная характеристика $U = \varphi(i_в)$ при $I = \text{const}$, $n = \text{const}$ дает ту же зависимость, но при постоянной величине нагрузки. С увеличением нагрузки эта характеристика идет ниже вследствие падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря и в переходном контакте щеток, а также вследствие насыщения полюсных наконечников, увеличивающегося с нагрузкой под влиянием потока реакции якоря. На фиг. 7 приведены нагрузочные характеристики для генераторов с независимым возбуждением.



Фиг. 7.

Внешняя характеристика $U = \varphi(I)$ дает зависимость напряжения генератора U от величины тока нагрузки I при постоянной скорости вращения. При этом в генераторах с независимым возбуждением ток возбуждения $i_в$ должен поддерживаться постоянным, а в шунтовых и компаундных генераторах должно быть неизменным сопротивление шунтовой цепи. Внешняя характеристика является основной для генераторов, так как стабильность напряжения при колебаниях нагрузки является весьма важной для приемников.

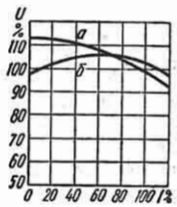
Кроме того, внешние характеристики определяют распределение нагрузки между генераторами при параллельной их работе.

Изменение напряжения генератора выражается в процентах его номинального напряжения.

Повышение напряжения при сбросе нагрузки (номинальное изменение напряжения)

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_н}{U_н} 100\%, \quad (7)$$

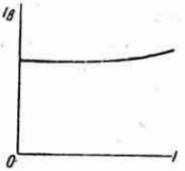
где $U_н$ — номинальное напряжение; U_0 — напряжение при сбросе нагрузки (напряжение холостого хода) при указанных выше условиях.



Фиг. 8.

На фиг. 8 приведены типичные внешние характеристики генераторов постоянного тока: *а* — генератора с параллельным возбуждением; *б* — генератора со смешанным возбуждением.

Регулировочная характеристика (фиг. 9) $i_в = \varphi(I)$ при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$ показывает, каким образом следует изменять ток возбуждения для поддержания постоянства напряжения при изменении нагрузки.



Фиг. 9.

Самовозбуждение генераторов постоянного тока заключается в том, что генератор не требует отдельного источника тока для питания обмотки возбуждения, как в случае машин с независимым возбуждением. Оно основано на явлении *остаточного магнетизма*. Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы ток, протекающий по обмотке возбуждения, усиливал поле остаточного магнетизма, и сопротивление цепи обмотки возбуждения было ниже некоторой критической величины.

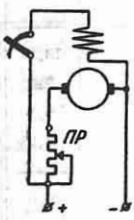
Регулирование напряжения генераторов с независимым, параллельным и смешанным возбуждением производится

путем изменения сопротивления цепи обмотки возбуждения при помощи шунтового реостата (см. фиг. 5, *а, б* и *г*).

Параллельная работа генераторов постоянного тока. Для включения генератора постоянного тока на параллельную работу с другим генератором необходимо, чтобы полярность соединяемых зажимов была одинаковой и чтобы напряжения генераторов были равны. Для нагрузки включенного генератора необходимо несколько увеличить его возбуждение.

Внешние характеристики параллельно работающих генераторов должны возможно меньше отличаться одна от другой.

Пуск и реверс электродвигателей постоянного тока. Пуск двигателя. При неподвижном двигателе э. д. с. якоря E равна нулю. Для уменьшения пускового тока в цепь якоря включается пусковой реостат *ПР* (фиг. 10). По мере разгона двигателя э. д. с. нарастает и ток уменьшается [формула (3)]. В соответствии с этим пусковой реостат постепенно выводится. Пуск должен происходить при номинальном токе возбуждения. Обмотка возбуждения не должна быть включена при пуске непосредственно на зажимы якоря, так как это вызовет значительное ослабление потока, а следовательно, и момента, в результате чего пуск может сильно затянуться или даже оказаться совсем невозможным.

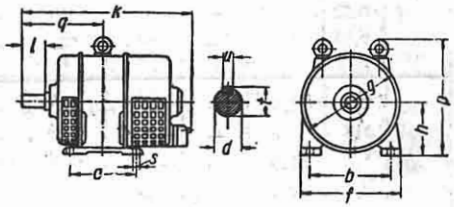


Фиг. 10.

Реверс двигателя. Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить полярность обмотки якоря или обмотки возбуждения.

Справочные сведения по двигателям постоянного тока

На фиг. 11 приведен эскиз машины постоянного тока общепромышленного типа ПН, а в табл. 4 и 4а приведены



Фиг. 11.

технические данные и основные габаритные размеры этих машин. Помимо машин ПН отечественной промышленностью изготовляются машины типа П мощностью от 65 до 450 *квт* и ряд специальных машин постоянного тока

Таблица 4

Размеры и вес машин постоянного тока ПН

Тип	Размеры в *мм*														Вес в *кГ*
	a	*b*	*d*	*f*	*g*	*h*	*k*	*l*	*p*	*q*	*s*	*t*	*u*	*w*	
ПН-2,5	130	145	12	175	184	100	310	30	192	150	9	13,5	4	46	18,5
ПН-5	210	180	16	220	230	118	419	40	277	209	11	18	5	57	44
ПН-10	240	210	20	262	270	140	494	50	317	251	15	22,5	6	56	65
ПН-17,5	260	225	25	280	280	150	520	60	333	274	15	28	8	56	80
ПН-28,5	210	245	30	300	325	170	477	60	376	236	15	33,5	10	66	96
ПН-45	245	245	35	300	325	170	538	80	386	279	15	38,5	10	66	107
ПН-68	225	285	35	350	375	200	562	80	448	275	22	38,5	10	65	138
ПН-85	290	285	40	350	375	200	638	90	448	317	22	43,5	12	65	175
ПН-100	280	420	40	500	500	265	751	90	585	326	22	43,5	12	—	290
ПН-145	320	420	50	500	500	265	811	110	585	366	22	55	16	—	330
ПН-205	320	510	50	610	605	320	880	110	720	380	22	55	16	—	480
ПН-290	360	510	60	610	605	320	940	130	720	420	22	65,5	18	—	530
ПН-400	400	570	60	700	690	355	1023—1183	130	810	495	26	65,5	18	—	795
ПН-550	450	570	70	700	690	355	1093—1253	150	810	540	26	76	20	—	900
ПН-750	450	680	70	825	805	425	1245—1405	150	923	595	34	76	20	—	1210
ПН-1000	500	680	90	825	805	425	1325—1485	180	923	650	34	97	24	—	1410
ПН-1320	545	800	90	950	930	500	1380—1540	180	1067	652	41	97	24	—	1760
ПН-1750	600	800	90	950	930	500	1435—1595	180	1067	680	41	97	24	—	2030

Таблица 4а

Технические данные двигателей постоянного тока типа ПН

Тип ПН	Номинальная мощность в *квт*			Номинальная скорость в об/мин			Максимальная скорость в об/мин			Вес в *кГ*	Маховой момент в *кГ·м²*	Ток якоря при 220 *в*
	При номинальном напряжении, в *в*											
	110	220	440	110	220	440	110	220	440			
2,5	0,7	0,7	—	2870	2870	—	2870	2870	—	18,5	0,012	4,5
	0,25	0,25	—	1440	1440	—	2870	2870	—			1,75
5	1,0	1,0	—	2800	2800	—	2800	2800	—	44	0,03	5,8
	0,75	0,75	—	2000	2000	—	2500	2500	—			4,5
	0,52	0,52	—	1450	1450	—	2000	2000	—			3,3
	0,30	0,30	—	960	960	—	1920	1920	—			2,1
10	2,4	2,4	—	2850	2850	—	2850	2850	—	65	0,08	13,3
	1,6	1,6	—	2000	2000	—	2600	2600	—			9,0
	1,0	1,0	1,0	1420	1420	1450	2500	2500	1800			6,1
	0,65	0,65	—	980	980	—	1960	1960	—			4,25
17,5	2,5	3,7	1,75	2000	2850	1450	2600	2850	1800	80	0,13	20,0
	1,75	2,7	—	1450	2100	—	2300	2700	—			15,0
	1,0	1,75	—	1000	1450	—	2000	2300	—			10,0
	—	1,0	—	—	1000	—	—	2000	—			5,8
28,5	4,2	5,3	—	2200	2800	—	2400	2800	—	96	0,23	29,3
	2,8	4,2	—	1500	2200	—	2200	2400	—			22,6
	—	2,8	—	1000	1500	—	—	2200	—			15,6
	1,6	1,6	1,6	—	1000	1000	2000	2000	1500			9,4
45	6,0	6,6	—	2000	2200	—	2300	2400	—	107	0,28	35,0
	4,2	4,2	—	1400	1500	—	2100	2100	—			22,6
	2,5	2,5	2,2	1000	1000	1000	1950	1950	1500			14,1
68	6,5	10,0	—	1550	2250	—	2000	2400	—	138	0,5	52,2
	—	6,5	—	1000	1550	—	—	2000	—			35,0
	3,7	3,7	3,7	—	1000	1000	1750	1750	1500			21,0
85	—	9,0	—	—	1500	—	—	2000	—	175	0,64	48,0
	5,6	5,6	5,6	1000	1000	1000	1750	1750	1500			30,0
100	15,0	15,0	8,0	1560	1600	1175	2100	2000	1500	290	1,6	81,5
	9,5	10,0	—	1100	1100	—	1900	1900	—			53,0
	5,8	5,8	—	800	800	—	1500	1500	—			34,0

Продолжение табл. 4а

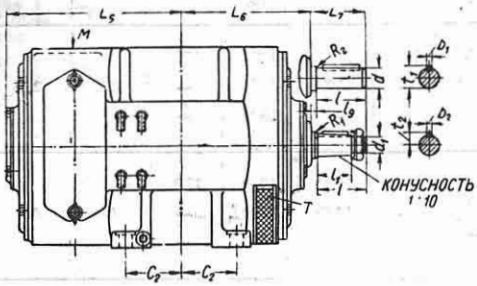
Тип ПН	Номинальная мощность в *квт*			Номинальная скорость в об/мин			Максимальная скорость в об/мин			Вес в *кГ*	Маховой момент в *кГм²*	Ток якоря при 220 *в*
	При номинальном напряжении, в *в*											
	110	220	440	110	220	440	110	220	440			
145	13,5	21,0	13,5	1100	1550	1100	2000	1900	1500	330	2,0	110,0
	8,5	13,5	—	800	1100	—	1500	1800	—			73,0
	—	8,5	—	—	800	—	—	1500	—			46,5
205	21,0	34,0	20,5	980	1580	1000	1600	1900	1500	480	4,0	178
	14,5	21,0	—	770	980	—	1400	1700	—			113
	—	15,0	—	—	770	—	—	1500	—			83
290	19,0	46,5	29,0	770	1500	1000	1300	1800	1500	530	4,8	238
	—	29,0	—	—	1000	—	—	1600	—			152
	—	19,0	—	—	770	—	—	1300	—			103
400	65	68	65	1450	1480	1450	1450	1900	1600	830	10,1	346
	43	43	43	950	950	980	1250	1550	1500			225
	22	22	—	590	590	—	1050	1150	—			118
550	60	92	88	980	1470	1470	1400	1470	1470	935	11,8	460
	30	60	60	600	980	980	1200	1500	1500			305
	—	30	—	—	600	—	—	1200	—			160
750	75	110	110	920	1350	1400	1400	1450	1500	1250	24,4	560
	40	75	70	600	900	960	1100	1250	1400			380
	—	40	—	—	620	—	—	1200	—			210
1000	70	130	105	750	1170	1000	1300	1350	1300	1510	29,2	665
	55	105	55	600	960	630	1000	1300	1100			525
	—	70	—	—	750	—	—	1150	—			358
	—	55	—	—	630	—	—	1180	—			282
1320	95	170	125	750	1250	950	1000	1350	1350	1810	53,3	860
	75	130	68	620	980	750	1050	1300	1250			655
	—	88	—	—	720	—	—	1150	—			450
	—	68	—	—	560	—	—	1050	—			350
1750	90	200	150	550	1150	1000	900	1250	1300	2160	61,4	1000
	—	165	110	—	970	750	—	1250	1200			820
	—	115	—	—	750	—	—	1350	—			575
	—	80	—	—	550	—	—	1050	—			405

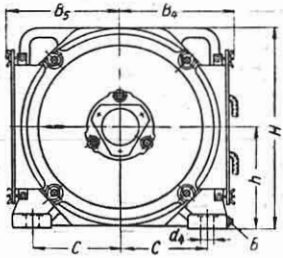
На фиг. 12 дан эскиз крапово-подъемных электродвигателей типа КПДН и металлургических типа МП, а в табл. 5 и 6 приведены технические данные и габаритные размеры их.

В табл. 6 указаны мощности при ПВ=25% (ПВ—продолжительность включения). При других величинах ПВ мощность двигателя может быть ориентировочно определена по формуле

$$P_x = P_{25}\sqrt{\frac{25}{ПВ_x}},$$

где P_{25} — мощность при ПВ = 25%, P_x — мощность при заданном $ПВ_x$.





Фиг. 12.

Электромашинные усилители (сокращенно ЭМУ) — специальные генераторы постоянного тока, обладающие высоким коэффициентом усиления по мощности.

Коэффициент усиления по мощности α_p — отношение мощности P_a на выходе ЭМУ, т. е. на зажимах цепи якоря, к мощности $P_в$, затрачиваемой в обмотке возбуждения:

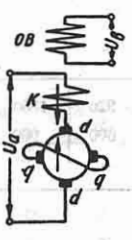
$$\alpha_p = \frac{P_a}{P_в}. \qquad (8)$$

Величина коэффициента α_p в ЭМУ достигает 10 000.

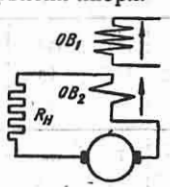
ЭМУ получили широкое применение для управления и регулирования электроприводов постоянного тока (поддержание постоянства скорости вращения, момента, натяжения и т. д.).

Усилитель с поперечным возбуждением (амплидин) (фиг. 13) — электромашинный усилитель, в котором большое усиление получается благодаря применению системы квадратичного (двухступенчатого) возбуждения.

Обмотка возбуждения (или обмотка управления) *ОВ*, к выводам которой приложено напряжение $U_в$ и в которую поступает небольшая мощность $P_в$, создает слабый магнитный поток по продольной магнитной оси *dd*. При вращении ЭМУ (он приводится во вращение двигателем) этот поток создает сильное магнитное поле по поперечной оси машины *qq*, так как поперечные щетки *qq* замкнуты накоротко (первая ступень усиления). Поперечный поток якоря наводит значительное напряжение U_a, появляющееся на продольных щетках *dd* якоря (вторая ступень усиления). Для того чтобы при нагрузке усилителя продольное поле якоря не ослабило поток обмотки возбуждения, ЭМУ снабжается компенсационной обмоткой *К*, расположенной на статоре, ампервитки которой компенсируют продольные ампервитки якоря.



Фиг. 13.



Фиг. 14.

Усилитель с критическим возбуждением (рототрол) (фиг. 14) — электромашинный усилитель, в котором большой коэффициент усиления получается благодаря применению последовательной обмотки возбуждения OB_2; ампервитки обмотки возбуждения действуют в том же направлении, что и ампервитки обмотки OB_2. При возбуждении обмотки управления OB_1 в замкнутой на внешнюю нагрузку $R_н$ цепи якоря проходит ток, и поле, создаваемое обмоткой OB_2, значительно усиливает первичный поток возбуждения.

Таблица 5

Габаритные размеры электродвигателей МП и КПДН в *мм*

Тип электродвигателя	L_5	L_6	L_7	l	l_1	l_6	B_4	B_5	b_1	b_2	C	C_2	d	d_1	d_4	H	h	t_1	t_2
МП-12	285	215	70	60	—	10	175	175	8	—	140	110	28	—	17	315	160^{-1}	31	—
КПДН-2У . .	305,5	251,5	84	70	—	14	210	210	10	—	150	95	32	—	17	360	180^{-1}	35,5	—
КПДН-2Ш, МП-22 . . .	325,5	271,5	84	70	—	14	210	210	10	—	150	115	32	—	17	360	180^{-1}	35,5	—
КПДН-3У . .	330	265,5	105	90	—	15	253	253	12	—	195	107,5	40	—	24	450	225^{-1}	43,5	—
КПДН-3Ш, МП-32 . . .	357,5	293	105	90	—	15	253	253	12	—	195	135	40	—	24	450	225^{-1}	43,5	—
КПДН-4У, МП-41 . . .	465	331	153	140	105	13	280	280	—	18	215	135	—	2м42	29	500	250^{-1}	—	32,5
КПДН-4Ш, МП-42 . . .	530	361	153	140	105	13	280	280	—	18	215	165	—	2м42	29	500	250^{-1}	—	32,5
КПДН-5У . .	577	369	155,5	140	105	15,5	306	306	—	20	240	170	—	2м48	24	565	$280^{-1,5}$	—	40,5
КПДН-5Ш . .	622	414	155,5	140	105	15,5	306	306	—	20	240	215	—	2м48	24	565	$280^{-1,5}$	—	40,5
МП-51	453,5	453,5	151	14.	105	3	405	315	20	20	280	375,5	75	2м48	32	620	$315^{-1,5}$	41	41
МП-52	518	518	151	140	105	3	405	315	20	20	280	440	75	2м48	32	620	$315^{-1,5}$	41	41
МП-62	582,5	582,5	181,5	170	130	5	455	365	24	24	330	460	90	2м60	39	730	$375^{-1,5}$	49	49
МП-72	681	681	229	210	165	5	500	410	32	32	370	554	110	2м80	46	810	$410^{-1,5}$	60	60
МП-82. МП-82а	730,5	730,5	259,5	250	200	7	555	465	36	36	420	617,5	130	2м100	50	930	$475^{-1,5}$	70	70

Примечание. *М* — отверстие для входа воздуха при независимой вентиляции; *Т* — отверстие для выхода воздуха; *Б* — болт для заземления (фиг. 12).

Таблица 6

Технические данные крано-подъемных и металлургических электродвигателей постоянного тока 220 и 440 *в*

Габарит	Тип электродвигателя	Закрытые, с естественным охлаждением, ПВ=25%									Максимальная скорость вращения в об/мин	Вес электродвигателя в *кГ*	Маховой момент в *кГм²*	Максимальный допустимый момент в *кГм*					
		квт	*а* около	об/мин	*квт*	*а* около	об/мин	*квт*	*а* около	об/мин				при скорости вращения не выше 20% номинальной			при номинальном напряжении		
		Последовательного возбуждения			Смешанного возбуждения			Параллельного возбуждения						последовательного возбуждения	смешанного возбуждения	параллельного возбуждения	последовательного возбуждения	смешанного возбуждения	параллельного возбуждения
Крано-подъемные электродвигатели																			
Электродвигатели 220 в																			
2	КПДН-2У	4,4	26	1210	4,3	25	1520	4,3	24	1525	3100	185	0,5	17	12	8,5	14	9,6	7
	КПДН-2Ш	5,5	31	1200	5,5	30	1450	5,2	28	1450	3000	205	0,62	22	16	10,5	18	13	8,5
3	КПДН-3У	7,8	43	1130	7,8	42	1300	7,7	41	1300	2800	285	1,0	33,5	25	17,5	27	20	14,5
	КПДН-3Ш	11,5	61	1130	11	58	1320	11	57	1340	2800	340	1,22	50	35	24	40	28,5	20
4	КПДН-4У	17,5	91	1000	17	87	1200	17,3	87,5	1200	2500	480	3,1	85	61	42	70	50	35
	КПДН-4Ш	23,2	122	910	22,4	116	1050	21,5	110	1100	2300	570	3,8	124	94	58	100	73	48
5	КПДН-5У	33	173	830	33	168	1000	29	148	950	2000	850	9,4	195	145	85	155	113	72
	КПДН-5Ш	43	222	820	43	220	930	37	185	980	2000	970	12,1	255	203	115	205	160	95
Электродвигатели 440 в																			
2	КПДН-2У	3,9	11,5	1430	3,8	11	1680	3,7	10,5	1720	3100	180	0,5	10,5	8	5	8,5	6	6
3	КПДН-3У	6	17,2	1120	5,9	16,5	1300	5,6	15,5	1325	2800	280	1,0	21	16	9,6	17	12	8
4	КПДН-4У	17	45	1020	16,5	43	1195	16	52	1210	2500	480	3,1	65	48	30	52	38	25
5	КПДН-5У	33	85	830	33	84	1000	29	74	980	2000	800	9,3	150	104	68	120	88	56

Электродвигатели 220 в

1	МП-12	2,5	15,6	1000	2,5	14,8	1200	2,5	14,2	1300	3250	132	0,20	12	9	5,6	9,7	7	4,7
2	МП-22	4,5	28	880	4,5	26,5	1100	4,5	26	1100	3100	205	0,62	25	18	12	20,5	14	10
3	МП-32	9	52	750	9	50	900	9	48	900	2600	340	1,22	59	44	29	47	34	24,5
4	МП-41	12,5	72	630	12	66	680	12	64	680	2200	480	3,1	97	77	51	77	60	42,5
	МП-42	17	92	630	16	86	700	16	84	700	2200	570	3,8	138	100	67	110	78	56
5	МП-51	25	134	570	24	128	580	23	120	600	2000	965	9,4	224	181	117	200	141	98
	МП-52	35	185	575	34	175	650	33	168	650	2000	1175	12,1	295	230	150	260	178	125
6	МП-62	50	260	510	46	235	580	46	231	580	1800	1850	22	478	348	235	380	270	195
7	МП-72	80	405	460	75	380	520	75	374	520	1600	2680	56	935	700	465	765	560	395
8	МП-82	105	530	420	100	500	475	100	500	475	1470	3900	101	1340	1025	675	1100	820	575
	МП-82а	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1470	3900	101	1340	1025	675	1100	820	575

Электродвигатели 440 в

2	МП-22	5	15	1030	5	14	1300	5	14	1300	3100	205	0,62	19	13,5	9	15	10,5	7,5
3	МП-32	7	21	730	7	20	900	7	19,6	900	2600	340	1,22	37,5	27	18	30	21	15
4	МП-42	16	44	630	15	41	700	15	40	700	2200	570	3,8	103	75	50	82,5	58,5	42
5	МП-52	35	92	580	33	87	650	33	84	650	2000	1175	12,1	235	178	119	188	138	99
6	МП-62	48	125	510	44	112	580	44	110	580	1800	1850	22	367	266	177	294	207	148
7	МП-72	77	195	460	73	182	520	73	180	520	1600	2680	56	720	547	361	590	438	307
8	МП-82	95	240	420	90	224	475	90	222	475	1470	3900	101	970	740	486	795	590	414

Таблица 7

Технические данные электромашинных усилителей

Тип	Номинальн. данные на выходе				Обмотки управления							
						Входная мощность каждой обмотки в *вт*			Отношение длительно допустимого тока к номинальному току			
	Напряжение в *в*	Мощность в *квт*	Ток якоря в *а*	Скорость вращения в об/мин	Число обмоток, шт.	при двух обмотках	при трех обмотках	при четырех обмотках	при двух обмотках	при трех обмотках	при четырех обмотках	К. п. д., %
ЭМУ-25	115 230 115 230	1,2 1,2 2,5 2,5	10,4 5,2 21,7 10,9	1440 1440 2950 2925	Две, три или четыре	0,5	0,75	0,9	9	7	5	68 74
ЭМУ-50	115 230 230	2,2 2,2 4,5	19,1 9,6 19,6	1440 1440 2935		0,5	0,75	0,9	9	7	5	78 80
ЭМУ-70	115 230 230	3,5 3,5 7,0	30,4 15,2 30,4	1450 1450 2900		0,5	0,75	0,9	9	7	5	78 80
ЭМУ-100	115 230 230	5,0 5,0 10,0	43,5 21,7 43,5	1450 1450 2900		0,5	0,75	0,9	9	7	5	81 84
ЭМУ-110	230	11,0	47,8	1450		0,5	0,75	0,9	9	7	5	82

Электромашинные усилители обычно имеют несколько обмоток возбуждения (управления), которые используются в зависимости от назначения схемы регулирования.

Технические данные некоторых ЭМУ с поперечным возбуждением приведены в табл. 7.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Определения

Трансформатор — статический аппарат, предназначенный для преобразования энергии переменного тока одного напряжения в энергию переменного тока другого напряжения.

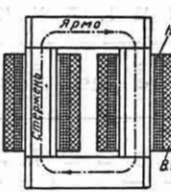
Активные части трансформатора — первичная обмотка, вторичная обмотка, магнитопровод.

Первичная обмотка — обмотка, предназначенная для включения к напряжению питающей сети или генератора.

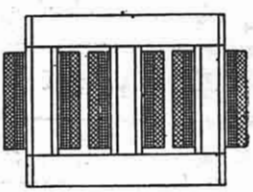
Вторичная обмотка—обмотка, предназначенная для подключения к ней приемников энергии или линии передачи.

Магнитопровод — стальной сердечник, предназначенный для проведения магнитного потока, создаваемого обмотками.

Конструкция трансформаторов. Магнитопровод собирается из листов специальной трансформаторной стали толщиной 0,3—0,5 *мм*. Листы стали изолируются один от другого тонкой бумагой или слоем лака. Магнитопровод



Фиг. 15.

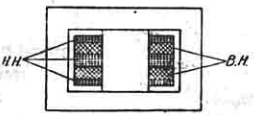


Фиг. 16.

состоит из стержней, на которые надеваются обмотки (фиг. 15), и ярма, которое замыкает магнитную цепь. Трансформаторы по конструкции разделяются на стержневые и броневые. Стержневые однофазные трансформаторы имеют два стержня (фиг. 15), трехфазные — три (фиг. 16), броневые однофазные трансформаторы (фиг. 17) имеют три стержня,

причем внешние стержни закрывают (бронируют) обмотку. Обмотки трансформаторов разделяются на цилиндрические, у которых осевой размер значительно больше радиального (фиг. 15), и дисковые, у которых радиальный размер велик по сравнению с осевым (фиг. 17).

Баки трансформаторов служат для помещения в них активной части трансформаторов; они изготовляются из листовой стали при помощи сварки. Баки



Фиг. 17.

заполняются минеральным трансформаторным маслом для более интенсивного охлаждения активных частей трансформатора и для повышения изоляции обмоток.

Расширители (консерваторы), устанавливаемые на крышке трансформатора, служат для расширения масла при его нагревании без повышения давления в баке и для уменьшения поверхности соприкосновения масла с воздухом.

Трансформаторы небольших мощностей выполняются также сухими, т. е. с естественным воздушным охлаждением.

Принцип действия трансформаторов. Эффективные значения э. д. с., наведенных главным потоком Ф в первичной и вторичной обмотках, соответственно равны

$$E_1 = 4{,}44 f \Phi_m w_1 \text{ в};$$

$$E_2 = 4{,}44 f \Phi_m w_2 \text{ в},$$

где f — частота в *гц* напряжения U_1; Φ_m — амплитудное значение потока в *в·сек*; w_1, w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток.

Отношение э. д. с. составляет

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{U_{20}}{U_1},$$

т. е. отношение э. д. с. равно отношению чисел витков обмоток и приблизительно равно отношению напряжений при холостой работе трансформатора.

При нагрузке трансформатора

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{w_1}{w_2},$$

т. е. отношение токов в обмотках приблизительно равно обратному отношению чисел витков.

Автотрансформатор отличается от обычного трансформатора тем, что он имеет одну обмотку на фазу (вместо двух). Принципиальная схема автотрансформатора дана на фиг. 18. Вторичное напряжение U_2 берется от некоторой промежуточной точки a обмотки.

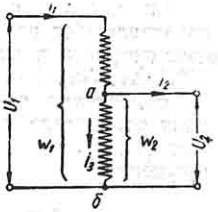
Коэффициент трансформации K_{12} определяется отношением чисел витков w_1 и w_2:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = K_{12}.$$

В части обмотки $аб$ протекает ток

$$I_3 = I_1 - I_2.$$

Благодаря этому при малом значении коэффициента трансформации автотрансформатор является более экономичным по сравнению с обычным трансформатором. При больших коэффициентах трансформации автотрансформатор теряет это преимущество. Кроме того, возникает опасность появления высокого потенциала во вторичной цепи.



Фиг. 18.

Автотрансформатор применяется для понижения напряжения при пуске синхронных и асинхронных двигателей и для других целей.

АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Общая характеристика. Трехфазные асинхронные электродвигатели являются наиболее распространенными в промышленности благодаря наиболее простой конструкции, минимальной стоимости и минимальной потребности в уходе по сравнению с любыми другими электрическими двигателями, возможности их включения в трехфазную сеть переменного тока без промежуточных преобразователей и рентабельности асинхронных двигателей при малых мощностях (по сравнению с синхронными двигателями).

Основные недостатки асинхронных двигателей: потребление реактивной энергии из сети и ограниченные воз-

можности регулирования скорости (по сравнению с двигателями постоянного тока). Менее существенные недостатки асинхронных двигателей отмечены при сравнении синхронных и асинхронных двигателей (см. стр. 408).

Основные понятия и термины. *Вращающееся поле* — магнитное поле, создаваемое в воздушном зазоре машины совокупным действием переменных токов в трех фазах обмотки статора (а также ротора).

Синхронная скорость вращения n_c — число оборотов в минуту вращающегося поля асинхронного двигателя, независимое от нагрузки на валу и скорости вращения ротора. Оно определяется только частотой сети f и числом пар полюсов p двигателя:

$$n_c = \frac{60f}{p} \text{ об/мин.} \qquad (9)$$

При частоте сети 50 *гц* двигатели изготовляются на следующие синхронные скорости вращения: 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500, 430, 375 об/мин.

Скольжение s — скорость вращения поля относительно ротора; часто выражается в процентах синхронной скорости вращения:

$$s = \frac{n_c - n}{n_c} 100\%, \qquad (10)$$

где n — скорость вращения ротора в об/мин.

Номинальное скольжение $s_н$ — скольжение двигателя при номинальной нагрузке на валу, номинальном напряжении и номинальной частоте сети.

Мощность P_1, забираемая двигателем из сети,

$$P_1 = \sqrt{3}\, U_1 I_1 \cos\varphi \cdot 10^{-3} \text{ квт},$$

где U_1 — линейное (междуфазовое) напряжение в *в*; I_1 — линейный ток в *а*.

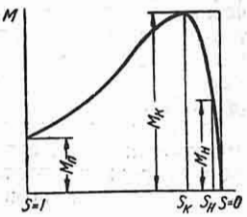
Мощность на валу P_2:

$$P_2 = \eta P_1,$$

где η — к. п. д. двигателя.

Начальный пусковой ток $I_п$ — линейный ток двигателя при неподвижном роторе и подключении статора к сети с номинальным напряжением и номинальной частотой при рабочем соединении обмоток.

Начальный пусковой момент $M_п$ — момент, развиваемый двигателем при неподвижном роторе и подключении статора к сети с номинальными напряжением и частотой при рабочем соединении обмоток (фиг. 19).



Фиг. 19.

Минимальный вращающий момент в процессе пуска — наименьший вращающий момент, развиваемый двигателем от $s = 1$ (неподвижный двигатель) до $s = s_к$ [скольжение, при котором имеет место максимальный (критический) момент]. Указанное уменьшение момента при пуске (по сравнению с начальным пусковым моментом) объясняется влиянием высших гармоник поля.

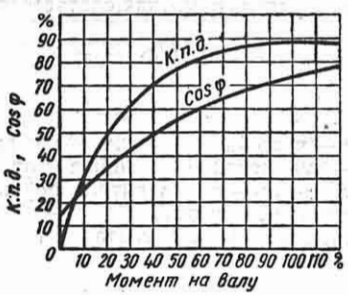
Номинальный момент $M_н$ — момент, развиваемый двигателем при номинальном режиме.

Максимальный момент $M_к$ — максимальная величина момента, который может развить двигатель при плавном увеличении нагрузки на валу (см. фиг. 19).

Ток холостого хода I_0 — линейный ток двигателя при отсутствии полезного момента на валу.

$$I_0 = (0{,}25 \div 0{,}40)\, I_{ном}$$

для двигателей общепромышленного назначения. В крановых двигателях ток холостого хода достигает величины $0{,}6\, I_{ном}$ и более.



Фиг. 20.

На фиг. 20 приведены типичные кривые к. п. д. и $\cos\varphi$ двигателя в зависимости от момента на валу.

Принцип действия. При включении двигателя в сеть трехфазная симметричная обмотка статора создает *вращающееся поле*, которое наводит э. д. с.

и ток в замкнутой обмотке ротора. В результате взаимодействия вращающегося поля и тока ротора создается крутящий момент, и ротор приходит во вращение в направлении вращения поля.

При холостом ходе двигателя скорость вращения ротора n почти равна синхронной скорости вращения n_c (скольжение двигателя s почти равно нулю). С увеличением нагрузки скольжение двигателя увеличивается (скорость вращения ротора падает), вместе с чем возрастают ток двигателя и электромагнитный момент его, уравновешивающий момент на валу. При некотором скольжении $s_к$ электромагнитный момент достигает максимального значения (см. фиг. 19). Если момент на валу превысит это значение, то двигатель затормозится до полного останова.

Асинхронный двигатель имеет жесткую характеристику. Его скорость вращения при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной изменяется незначительно.

Устройство. Сердечники статора и ротора асинхронного двигателя собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*.

Обмотка статора, предназначенная для присоединения к сети, трехфазная, распределенная, помещается в пазах статора. Три фазы обмотки соединяются в звезду или треугольник.

Обмотка ротора может иметь различное устройство в зависимости от назначения двигателя.

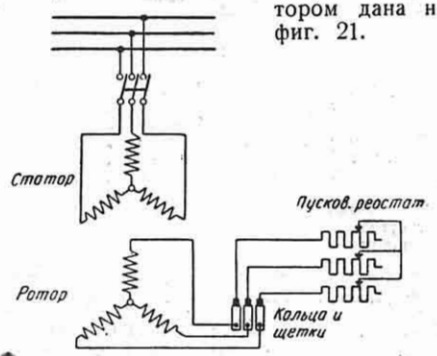
По устройству ротора различают асинхронные двигатели следующих видов.

1. Асинхронные двигатели с фазовым ротором и контактными кольцами. В этом случае обмотка ротора выполняется трехфазной, причем концы ее выводятся на три кольца, посаженные на валу, для соединения с пусковым реостатом. У двигателей, предназначенных для длительной работы, по окончании пуска фазная обмотка может замыкаться накоротко с последующим подъемом щеток.

2. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Короткозамкнутая обмотка ротора (беличья клетка) состоит из медных, латунных или алюминиевых стержней, помещенных в пазах ротора, причем стержни замыкаются с торцов ротора кольцами.

3. Асинхронные двигатели со специальным ротором рассматриваются ниже.

Принципиальная схема включения асинхронного двигателя с фазовым ротором дана на фиг. 21.



Фиг. 21.

Обозначения выводов роторных обмоток трехфазных асинхронных машин даны в табл. 8.

Таблица 8

Обозначения выводов роторных обмоток трехфазных асинхронных машин

Число выводов на контактных кольцах	Названия выводов	Обозначения	
		Начало	Конец
3	Первая фаза	P1	
	Вторая "	P2	
	Третья "	P3	
4	Первая "	P1	
	Вторая "	P2	
	Третья "	P3	
	Нулевая точка	0	
6	Первая фаза	P1	P4
	Вторая "	P2	P5
	Третья "	P3	P6

Обозначения выводов статорных обмоток асинхронных и синхронных машин приведены в табл. 9.

Асинхронные двигатели со специальным ротором. Для улучшения пусковых характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя, т. е. для уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента, выполняются двигатели со специальным ротором — двойной клеткой в роторе или глубоким пазом.

Таблица 9

Обозначения выводов статорных обмоток асинхронных и синхронных машин

Схема соединений обмоток	Число выводов	Названия выводов	Обозначения: Начало	Обозначения: Конец
Открытая схема	6	Первая фаза	C1	C4
		Вторая „	C2	C5
		Третья „	C3	C6
Соединение звездой	3 или 4	Первая „	C1	
		Вторая „	C2	
		Третья „	C3	
		Нулевая точка	0	
Соединение треугольником	3	Первый зажим	C1	
		Второй „	C2	
		Третий „	C3	

Двигатели с двойной клеткой Доливо-Добровольского. Паз ротора показан на фиг. 22. Стержни верхней клетки ротора выполняются из материала с большим удельным сопротивлением — латуни, алюминиевой бронзы и т. д. Нижняя клетка, которая выполняется из красной меди, охватывается большим числом линий потока рассеяния. Поэтому при пуске (при больших скольжениях) ток идет главным образом по стержням верхней клетки, имеющей большее сопротивление. Это равносильно включению внешнего реостата в двигателе с контактными кольцами и приводит к одновременному уменьшению пускового тока и увеличению пускового момента. В нормальном режиме (при малых скольжениях) ток проходит главным образом по нижней клетке, имеющей малое сопротивление.

Фиг. 22.

В табл. 10 приведено сравнение пусковых характеристик двигателей с двойной клеткой и нормальных асинхронных двигателей.

Двигатель с глубоким пазом. Форма паза ротора — по фиг. 23. Принцип действия в основном тот же, что и в двигателе с двойной клеткой: вытеснение тока при больших скольжениях в верхнюю часть паза.

Область применения двигателей с повышенным пусковым моментом — краны, элеваторы, лебедки и т. д.

Фиг. 23.

Двигатель с двойной клеткой в конструктивном отношении сложнее двигателя с глубоким пазом, но обладает бо́льшим пусковым моментом. Двигатели с двойной клеткой применяются для приводов с повышенным начальным моментом сопротивления (шаровые мельницы, дробилки, поршневые компрессоры и т. д.).

Вопросы пуска и регулирования скорости асинхронных электродвигателей рассмотрены в главе XIV.

Справочные данные по асинхронным электродвигателям

На фиг. 24 приведен габаритный эскиз асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором серии А, а в табл. 11, 11а и 12 — технические данные и габаритные размеры. Размеры относятся к защищенным электродвигателям в чугунной оболочке горизонтального исполнения на лапах (форма Щ2). Следует заметить, что основные монтажные размеры C, C_2 и h сохраняются для всех двигателей горизонтального исполнения на лапах.

Двигатели серии А строятся на напряжение 220, 380 и 500 *в*, а двигатели малых габаритов — до 5-го включительно и на 127 *в*.

Двигатели серии А могут выполняться в следующих конструктивных модификациях:

а) двигатели в алюминиевой оболочке (АЛ);

Таблица 10

Пусковые характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Пусковые характеристики	Двигатели: с двойной клеткой			с нормальным ротором
Отношение пускового момента к номинальному	2,0	1,5	1,0	0,8—1,3
Отношение пускового тока к номинальному	4,5—5	3,5—3,8	3,2—3,5	5—8

Таблица 11

Габаритные размеры электродвигателей типа А

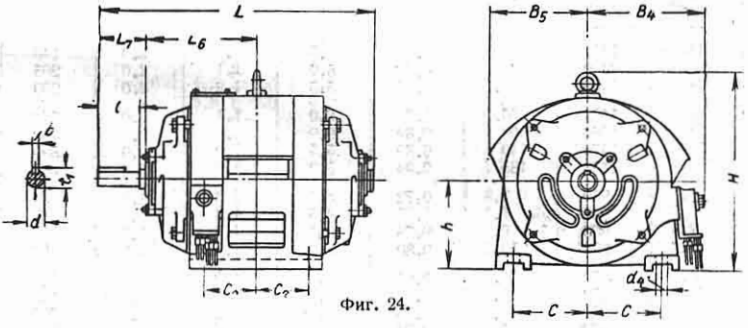
Тип электродвигателя	Размеры в *мм*													
	P_1	B_5	b	C	C_2	d	d_4	H	h	L	L_6	L_7	l	t_1
3000, 1500 и 1000 об/мин (синхронные)														
А31	137	113	5	85	45	18	12,5	200	100	273	109	46	40	20
А32	137	113	5	85	60	18	12,5	200	100	309	124	46	40	20
А41	162	140	8	105	55	25	15	282	125	344	138	67	60	28
А42	162	140	8	105	75	25	15	282	125	384	158	67	60	28
А51	217	188	10	142,5	75	35	19	378	170	441	174	91	80	38,5
А52	217	188	10	142,5	100	35	19	378	170	491	199	91	80	38,5
3000 об/мин (синхронные)														
А61 и 62	275	225	10	157,5	160	35	19	460	200	580	235	115	80	38,5
А71 „ 72	322	258	12	185	200	38	24	530	236	685	287	113	80	41,5
А81 „ 82	375	300	16	220	265	55	30	640	280	875	372	143	110	60
А91 „ 92	440	352	16	262,5	325	55	30	740	335	1005	446	124	110	60
1500, 1000 и 750 об/мин (синхронные)														
А61 и 62	275	225	14	157,5	160	45	19	460	200	562	217	133	110	49
А71 „ 72	322	258	16	185	200	55	24	530	236	665	276	124	110	60
А81 „ 82	375	300	19	220	265	65	30	640	280	860	355	160	140	70,5
А91 „ 92	440	352	20	262,5	325	75	30	740	335	970	415	155	140	81

б) двигатели закрытые, обдуваемые как в чугунной оболочке (АО), так и в алюминиевой оболочке (АОЛ);

в) двигатели с двумя концами вала;

е) двигатели с контактными кольцами (АК).

Промышленностью выпускаются также асинхронные электродвигатели с фазным



Фиг. 24.

г) фланцевые для горизонтальной установки;

д) фланцевые для вертикальной установки;

е) встраиваемые электродвигатели (АВ).

Двигатели серии А допускают следующие электрические модификации:

а) нормальное исполнение (А, АО, АЛ);

б) двигатели с повышенным пусковым моментом (АП, АОП, АЛП);

в) двигатели с повышенным скольжением (АС, АОС, АЛС);

г) двигатели для текстильной промышленности (АТ, АОТ);

д) многоскоростные двигатели (двух-, трех- и четырехскоростные);

(фиг. 25) и короткозамкнутым ротором (фиг. 26), предназначенные для повторно-кратковременного режима работы (крановые и металлургические). В табл. 13, 13а, 14 и 14а приведены их основные габаритные размеры и технические данные.

Однофазные асинхронные двигатели небольшой мощности находят применение для привода бытовых приборов и устройств (вентиляторы, стиральные машины, холодильники, швейные машины и т. д.). Однофазная обмотка статора предназначена для приключения к сети. Обмотка ротора — короткозамкнутая (беличья клетка).

Таблица 11а

Технические данные трехфазных асинхронных электродвигателей

Тип А	Номинальная мощность в *квт*	При номинальной нагрузке			$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	Вес в *кГ*	Маховой момент ротора в *кГм²*
		Скорость вращения в об/мин	Ток статора в *а* при напряжении 380 *в*	cos φ					
31-2	1,0	2850	2,2	0,86	5,5	1,8	2,2	17	0,008
32-2	1,7	2850	3,7	0,87	6,0	2,0	2,4	24	0,014
41-2	2,8	2870	5,8	0,88	5,5	1,6	2,2	34	0,024
42-2	4,5	2870	9,1	0,88	6,0	1,8	2,4	42	0,034
51-2	7,0	2890	13,8	0,89	6,0	1,5	2,2	70	0,11
52-2	10	2890	19,5	0,89	6,5	1,6	2,4	91	0,16
61-2	14	2920	27,5	0,89	5,5	1,2	2,5	130	0,27
62-2	20	2920	38,0	0,90	6,0	1,3	2,7	145	0,35
71-2	28	2930	53,0	0,90	5,0	1,0	2,2	210	0,57
72-2	40	2930	74,0	0,91	5,5	1,1	2,4	235	0,73
81-2	55	2930	101	0,91	5,0	1,0	2,2	370	1,4
82-2	75	2930	136	0,92	5,5	1,1	2,4	415	1,8
91-2	100	2950	180	0,92	5,5	1,0	2,2	605	3,3
92-2	125	2950	225	0,92	5,5	1,0	2,2	685	4,3
31-4	0,6	1410	1,6	0,76	5,0	1,7	2,0	17	0,013
32-4	1,0	1410	2,4	0,79	5,0	1,8	2,0	24	0,019
41-4	1,7	1420	3,9	0,82	5,0	1,8	2,0	34	0,042
42-4	2,8	1420	6,1	0,84	5,5	1,9	2,0	42	0,06
51-4	4,5	1440	9,4	0,85	6,0	1,4	2,0	70	0,17
52-4	7,0	1440	14,2	0,86	6,0	1,5	2,0	91	0,25
61-4	10	1450	19,7	0,88	5,0	1,2	2,0	125	0,36
62-4	14	1450	27,5	0,88	5,5	1,3	2,0	140	0,48
71-4	20	1450	39,0	0,88	5,0	1,1	2,0	205	0,95
72-4	28	1450	54,0	0,88	5,5	1,2	2,0	230	1,2
81-4	40	1460	76,0	0,89	6,0	1,1	2,0	360	1,9
82-4	55	1460	103	0,89	6,0	1,2	2,0	400	2,5
91-4	75	1460	140	0,89	5,5	1,0	2,0	590	4,7
92-4	100	1460	185	0,89	5,0	1,0	2,0	665	6,2
41-6	1,0	930	2,8	0,72	4,0	1,3	1,8	34	0,042
42-6	1,7	930	4,3	0,75	4,5	1,4	1,8	42	0,06
51-6	2,8	950	6,6	0,78	5,0	1,3	1,8	70	0,17
52-6	4,5	950	10,1	0,80	5,5	1,5	1,8	91	0,25
61-6	7,0	970	15,5	0,81	4,5	1,1	1,8	125	0,36
62-6	10	970	21,5	0,82	4,5	1,1	1,8	140	0,48
71-6	14	970	29,6	0,83	4,5	1,2	1,8	205	1,5
72-6	20	970	41,3	0,84	4,5	1,2	1,8	230	1,9
81-6	28	975	56,5	0,85	5,0	1,2	1,8	360	3,2
82-6	40	975	79,8	0,86	5,5	1,3	1,8	400	4,1
91-6	55	980	106	0,87	5,0	1,0	1,8	590	7,0
92-6	75	980	141	0,88	5,0	1,0	1,8	665	9,2
61-8	4,5	730	11	0,76	4,5	1,0	1,7	125	0,7
62-8	7,0	730	16	0,78	4,5	1,0	1,7	140	0,9
71-8	10	730	22	0,80	4,0	1,1	1,7	205	1,5
72-8	14	730	30	0,81	4,0	1,1	1,7	230	1,9
81-8	20	730	42	0,82	4,5	1,1	1,7	360	3,2
82-8	28	730	58	0,83	4,5	1,2	1,7	400	4,1
91-8	40	730	81	0,84	4,5	1,1	1,7	590	7,0
92-8	55	730	109	0,84	4,5	1,1	1,7	665	9,2

Таблица составлена для двигателей в чугунной оболочке в защищенном исполнении. Для двигателей с алюминиевой оболочкой, а также для двигателей в обдуваемом исполнении с чугунной и алюминиевой оболочкой (АО и АОП) электрические данные отличаются от табличных незначительно.

Таблица 12

Технические данные асинхронных двигателей серий АП, АС, АОП, АОС

Серия		АП			АС			АОП			АОС			
Исполнение корпуса		Защищенное						Закрытое обдуваемое						
Характеристика		С повышенным пусковым моментом			С повышенным скольжением			С повышенным пусковым моментом			С повышенным скольжением			
Синхронная скорость в об/мин		1500	1000	750	1500	1000	750	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
Пределы мощности в *квт*	от	10	7	4,5	9,5	6,8	4,3	1,7	1,0	4,5	0,6	0,6	0,9	4,3
	до	100	75	55	65	39	30	100	75	55	5,3	65	47	36
Номинальное скольжение в %	от	3,0	4,0	2,7	13	15	15	5,3	7,0		11	16	16,0	14
	до	2,7	2,0		8	9	11	2,0	1,5	2,0		7	9,0	10
К. п. д. при номинальной нагрузке в %	от	86,5	85,0	82,5	79	75,0	71,5	81,0	76,5	82,5	70,0	67,0	69,5	72,0
	до	91,5	91,5	90,5	85,5	84,0	81,0	91,5	91,5	90,5	79,0	85,0	83,0	82,0
cos φ при номинальной нагрузке	от	0,86	0,80	0,74	0,88	0,82	0,76	0,82	0,72	0,74	0,89	0,81	0,78	0,79
	до	0,88	0,87	0,81	0,90	0,90	0,84	0,89	0,89	0,82	0,91	0,91	0,91	0,86
$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	от	6,0	4,5	5,0	4,5	4,0	3,5	5,5	4,5	6,0	5,5	5,0	4,0	4,0
	до	6,5	6,5	6,0	5	4,5	4,0	7,5	7,0	7,0		6,0	5,5	4,5
$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	от	1,8	1,8	1,7	2,3	2,1	1,9	1,8	1,8	1,8	2,5	2,3	2,2	2,1
	до				2,0	1,9	2,0	2,0	2,0			2,0		
$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	от	2,2	2,2	2,2	2,4	2,3	2,2	2,3	2,2	2,4	2,5	2,3	2,2	2,4
	до				2,5	2,4	2,2	2,8	2,5	2,3		2,6	2,5	

Примечание. Пределы мощностей, скольжение, к. п. д., cos φ, пусковые токи, начальные и максимальные моменты для серий АС и АОС указаны для ПВ = 100%.

Принцип действия. Однофазная обмотка статора, будучи приключена к сети, создает неподвижное в пространстве и пульсирующее во времени магнитное поле. По воздействию на ротор неподвижное пульсирующее поле Ф эквивалентно двум полям $\frac{\Phi}{2}$, вращающимся в противоположных направлениях.

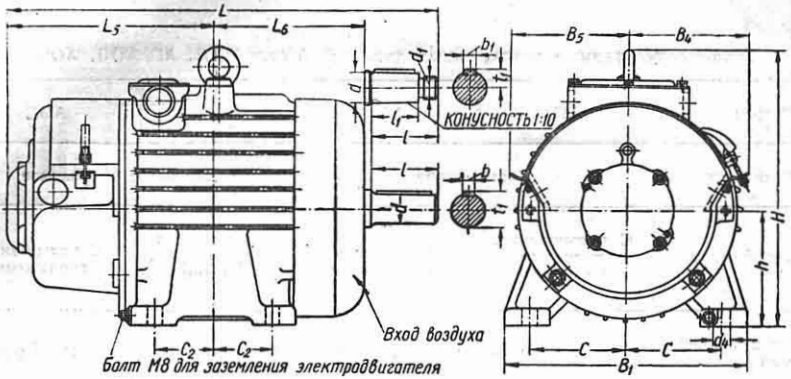
При неподвижном роторе воздействие обоих полей на ротор одинаково, и суммарный момент равен нулю Если ротор двигателя привести каким-либо способом во вращение в ту или другую сторону. то прямое поле, т. е. поле, вращающееся в направлении ротора, будет создавать больший момент, чем обратное поле.

При холостом ходе скорость двигателя близка к синхронной скорости

$$n_c = \frac{60f}{p}$$

(т. е. скольжение близко к нулю).

При нагрузке скольжение двигателя увеличивается (скорость вращения падает).



Фиг. 25.

Таблица 13

Габаритные размеры электродвигателей МТ в *мм*

Величина	Тип электродвигателя	L	L_5	L_6	l	l_1	B_1	B_4	B_5	b	b_1	C	C_2	d	d_1	H	h	t_1
1	МТ-11-6 *	590	304	202	80	—	290	151	151	10	—	110	75	35	17	353	150^{-1}	38,5
	МТ-12-6 *	647	331,5	229,5	80	—	290	151	151	10	—	110	102,5	35	17	353	150^{-1}	38,5
2	МТ-21-6 *	682	333,5	225	110	—	320	172	172	12	—	122,5	95	40	22	395	170^{-1}	43,5
	МТ-22-6 *	735	360	251,5	110	—	320	172	172	12	—	122,5	121,5	40	22	395	170^{-1}	43,5
3	МТ-31-6 * МТ-31-8 *	766	370,5	276,5	110	—	360	193	193	16	—	140	130	50	22	460	190^{-1}	55
4	МТ-41-8 **	835	402	276	140	105^{+06}	440	230	230	—	18	165	110	65	26	528	225^{-1}	35
	МТ-42-8 **	915	442	316	140	105^{+06}	440	230	230	—	18	165	150	65	26	528	225^{-1}	35
5	МТ-51-8 **	976	475	340,5	140	105^{+06}	500	255	255	—	20	190	137,5	70	33	582	250^{-1}	38
	МТ-52-8 **	1056	515	380,5	140	105^{+06}	500	255	255	—	20	190	177,5	70	33	582	250^{-1}	38
6	МТ-61-10 **	1152	554	409	170	130^{+07}	650	320	320	—	24	260	172,5	90	39	764	315—1,5	49
	МТ-62-10 **	1252	604	459	170	130^{+07}	650	320	320	—	24	260	222,5	90	39	764	315—1,5	49
	МТ-63-10 **	1347	651	507	170	130^{+07}	650	320	320	—	24	260	270	90	39	764	315—1,5	49
7	МТ-71-10 **	1423	670	523	210	165^{+07}	790	383	383	—	32	320	220	110	46	923	400—1,5	60
	МТ-72-10 **	1493	705	558	210	165^{+07}	790	383	383	—	32	320	255	110	46	923	400—1,5	60
	МТ-73-10 **	1573	745	598	210	165^{+07}	790	383	383	—	32	320	295	110	46	923	400—1,5	60

Примечание. Присоединение подводящих кабелей к статору и ротору электродвигателей может быть произведено как с правой, так и с левой стороны.

* Концы валов цилиндрические.
** Концы валов конические.

Таблица 13а

Технические данные асинхронных крановых и металлургических двигателей трехфазного тока серии МТ (с фазовым ротором)

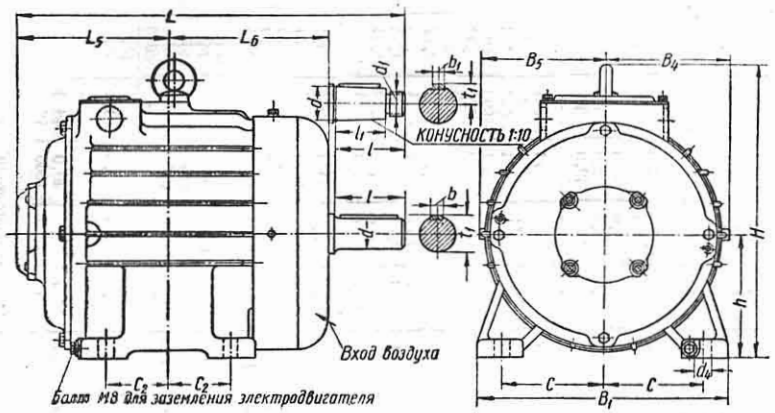
Данные двигателей	ПВ в %	Тип двигателя															
		МТ-11-6	МТ-12-6	МТ-21-6	МТ-22-6	МТ-31-6	МТ-31-8	МТ-41-8	МТ-42-8	МТ-51-8	МТ-52-8	МТ-61-10	МТ-62-10	МТ-63-10	МТ-71-10	МТ-72-10	МТ-73-10
Мощность на валу в *квт*	15	2,7	4,2	6,5	9,5	13,2	9,3	13,2	18,0	26,5	36,0	36,0	55,0	72,0	96,0	120	150
	25	2,2	3,5	5,0	7,5	11,0	7,5	11,0	16,0	22,0	30,0	30,0	45,0	60,0	80	100	125
	40	1,8	2,5	4,2	6,3	8,7	6,3	8,8	13,0	17,5	23,5	24,0	36,0	48,0	63,0	80,0	100
	60	1,5	2,0	3,4	5,0	7,0	5,0	7,0	10,5	14,5	19,0	20,0	30,0	40,0	52,0	65,0	86,0
	100	1,1	1,7	2,3	3,6	5,0	3,6	5,0	7,0	10,0	14,0	15	24	30	42,0	53,0	65,0
Скорость вращения в об/мин	15	855	855	922	928	944	688	708	713	716	720	569	572	572	578	581	582
	25	885	910	940	945	953	702	715	718	723	725	574	577	577	582	584	585
	40	910	940	950	957	962	712	722	724	728	730	579	582	581	585	587	588
	60	925	955	960	966	970	730	728	729	732	734	583	585	584	588	590	590
	100	945	960	972	978	980	728	735	735	738	738	587	588	588	590	590	592
cos φ	15	0,78	0,79	0,75	0,76	0,76	0,75	0,73	0,73	0,75	0,78	0,72	0,72	0,81	0,76	0,75	0,77
	25	0,72	0,73	0,68	0,69	0,71	0,69	0,67	0,64	0,70	0,74	0,67	0,71	0,77	0,71	0,71	0,73
	40	0,64	0,62	0,62	0,64	0,65	0,63	0,60	0,62	0,63	0,67	0,61	0,64	0,72	0,65	0,65	0,68
	60	0,58	0,54	0,55	0,56	0,57	0,55	0,52	0,55	0,56	0,60	0,55	0,58	0,67	0,59	0,58	0,63
	100	0,49	0,49	0,43	0,46	0,46	0,45	0,42	0,42	0,44	0,50	0,45	0,51	0,57	0,52	0,51	0,54
К. п. д. в %	15	63,0	69,5	75,0	78,0	81,0	76,5	80,5	82,5	84,0	85,0	84,5	87,0	87,5	89,5	90,0	90,5
	25	64,0	70,5	74,5	78,5	82,5	77,5	81,0	82,5	84,5	86,0	84,5	87,5	88,5	89,5	89,5	90,5
	40	64,5	69,5	74,5	78,0	82,0	78,0	80,0	82,5	84,0	85,5	84,0	87,0	88,0	89,0	89,5	90,5
	60	63,0	67,5	73,0	77,0	81,0	77,0	77,5	81,0	83,0	85,0	83,5	86,0	88,0	88,0	88,5	90,0
	100	58,5	65,5	68,0	77,0	77,5	73,0	73,5	77,5	80,0	82,5	81,5	85,0	86,5	86,5	87,5	88,5
Ток ротора в *а*	15	16,3	15,5	28,0	28,8	43,6	36,0	57,3	52,5	86,2	90,5	164	170	183	204	203	212
	25	12,8	12,2	20,6	21,6	35,6	28,0	46,7	46,3	70,5	74,3	133	138	160	167	170	175
	40	10,2	8,5	17,3	18,1	28,0	23,0	36,5	38,0	55,0	56,5	105	109	118	130	132	136
	60	8,4	6,8	14,0	14,4	22,5	18,0	29,0	27,6	45,5	45,6	87,0	90,0	98,0	107	107	116
	100	5,8	5,7	9,6	10,3	16,0	12,8	20,7	19,5	30,8	32,5	65,0	72,0	74,0	85,0	89,0	89,0
Напряжение ротора в *в*		135	204	164	227	200	185	155	222	197	257	142	206	253	294	368	442
Кратность максимального момента к номинальному при ПВ=25%		2,3	2,5	2,9	2,8	3,1	2,6	2,9	3,0	3,0	3,0	3,3	3,2	2,9	3,3	3,3	3,4
Маховой момент в *кГм²*		0,17	0,27	0,41	0,57	1,05	1,05	1,86	2,70	4,40	5,70	13,0	17,5	22,0	40,0	48,0	57,0
Вес в *кГ*		90	109	145	163	218	218	300	365	435	510	785	945	1100	1550	1650	1850

Примечания: 1. Двигатели исполняются для напряжений 220, 380 и 500 *в*.

2. Для двигателей МТ-11, 12, 21, 22, 31 концы валов цилиндрические, у двигателей больших габаритов — конические. Двигатели могут быть поставлены с двумя концами вала.

3. Двигатели изготовляются в закрытом обдуваемом исполнении.

4. Электродвигатели для металлургических приводов и для приводов, работающих при температуре окружающего воздуха выше +35° С, выполняются с изоляцией класса В, что должно быть оговорено в заказе. Двигатели МТ-11 и МТ-12 выполняются только с изоляцией класса А.



Фиг. 26.

Таблица 14

Габаритные размеры электродвигателей МТК в *мм*

Величина	Тип электродвигателя	L	L_5	L_6	l	l_1	B_1	B_4	B_5	b	b_1	C	C_2	d	d_1	d_4	H	h	t_1
1	МТК-11-6 *	470	182	202	80	—	290	151	151	10	—	110	75	35	—	17	353	150^{-1}	38,5
	МТК-12-6 *	525	209,5	229,5	80	—	290	151	151	10	—	110	102,5	35	—	17	353	150^{-1}	38,5
2	МТК-21-6 *	558	209,5	225	110	—	320	172	172	12	—	122,5	95	40	—	22	395	170^{-1}	43,5
	МТК-22-6 *	611	236	251,5	110	—	320	172	172	12	—	122,5	121 5	40	—	22	395	170^{-1}	43,5
3	МТК-31-6 * МТК-31-8 *	650	254,5	276,5	110	—	360	193	193	16	—	140	130	50	—	22	460	190^{-1}	55
4	МТК-41-8 **	691	258	276	140	$105^{+0,6}$	440	230	230	—	18	165	110	65	2М42	26	528	225^{-1}	35
	МТК-42-8 **	771	298	316	140	$105^{+0,6}$	440	230	230	—	18	165	150	65	2М42	26	528	225^{-1}	35
5	МТК-51-8 **	819	318	340,5	140	$105^{+0,6}$	500	255	255	—	20	190	137,5	70	2М48	33	582	250^{-1}	38
	МТК-52-8 **	899	358	380,5	140	$105^{+0,6}$	500	255	255	—	20	190	177,5	70	2М48	33	582	250^{-1}	38

* Концы валов цилиндрические
** Концы валов конические.

Таблица 14а

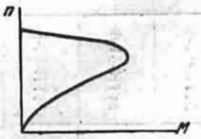
Технические данные асинхронных крановых и металлургических двигателей серии МТК (с короткозамкнутым ротором)

Данные двигателей	Типы двигателей										
	ПВ в %	МТК-11-6	МТК-12-6	МТК-21-6	МТК-22-6	МТК-31-6	МТК-31-8	МТК-41-8	МТК-42-8	МТК-51-8	МТК-52-8
Мощность на валу в *квт*	15	2,7	4,0	6,2	9,0	13,5	9,3	13,5	19,5	26,5	33,5
	25	2,2	3,5	5,0	7,5	11,0	7,5	11,0	16,0	22,0	28,0
	40	1,8	2,8	4,2	6,3	9,5	6,5	9,5	13,0	17,5	22,0
	60	1,5	2,3	3,5	5,0	7,5	5,3	8,0	10,5	14,5	19,0
	100	1,1	1,8	2,5	3,6	6,0	3,7	5,3	7,0	10,0	14.0
Скорость вращения в об/мин	15	837	852	880	880	896	657	665	667	625	681
	25	883	875	910	905	920	682	685	685	692	695
	40	910	907	925	922	930	693	695	700	705	708
	60	926	923	938	938	945	705	705	710	713	715
	100	947	940	955	955	955	720	722	723	726	726
$\cos\varphi$	15	0,82	0,82	0,81	0,81	0,83	0,82	0,78	0,81	0,81	0,83
	25	0,76	0,78	0,75	0,76	0,78	0,76	0,73	0,76	0,77	0,79
	40	0,69	0,70	0,70	0,71	0,74	0,71	0,68	0,69	0,71	0,73
	60	0,63	0,63	0,64	0,63	0,66	0,63	0,63	0,62	0,65	0,68
	100	0,52	0,55	0,52	0,52	0,58	0,51	0,48	0,48	0,53	0,58
К. п. д. в %	15	65,5	69,0	73,5	76,0	79,0	74,5	77,0	79,0	80,5	82,0
	25	68,5	70,5	75,0	77,5	81,0	78,0	79,0	80,5	82,5	83,5
	40	69,0	72,0	75,5	77,5	81,5	79,5	79,5	81,5	83,0	84,0
	60	68,0	72,0	75,0	77,5	81,5	79,5	79,5	81.0	83,0	84,0
	100	64,0	70,0	72,0	75,0	80,0	77,0	77,5	79,0	81,0	83,0
Кратность по отношению к номинальным величинам при ПВ=25%	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	2,6	2,6	3,1	3,1	3,4	3,0	3,2	3,3	3,1	3,2
	$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	2,6	2,6	2,9	3,0	3,2	2,9	3,0	3,1	2,8	2,8
	$\frac{I_{нач}}{I_{ном}}$	3,3	3,6	4,3	4,4	5,1	4,5	4,5	4,8	5,0	5,2
Допустимое по нагреву число пусков в час вхолостую [1]		1600	1600	1100	900	750	1200	900	800	550	550
Маховой момент ротора в $кГ м^2$		0,16	0,25	0,39	0,55	1,00	1,00	1,78	2,60	4,20	5,50
Вес в *кг*		79	98	130	153	205	205	267	332	415	490

[1] Допустимое число пусков указано при условии, что двигатель пускается только вхолостую без привода и по окончании пуска отключается от сети. Нагрев, вызванный наличием привода и статического момента сопротивления, должен учитываться особо.

Для двигателей МТК действительны примечания 1—4 к табл. 13а.

Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя имеет вид кривой, представленной на фиг. 27.



Фиг. 27.

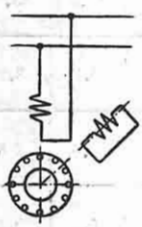
Пуск и пусковые схемы. Наиболее простая пусковая схема изображена на фиг. 28.

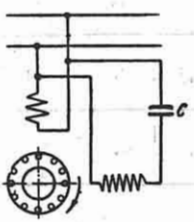
На статоре имеется вспомогательная короткозамкнутая обмотка, расположенная под углом 45° по отношению к главной обмотке статора. Вследствие трансформаторной связи в пусковой обмотке наводится ток, сдвинутый по фазе относительно тока рабочей обмотки.

В результате совокупного действия токов обеих обмоток статора в двигателе создается некоторое вращающееся поле, которое приводит во вращение ротор.

В других случаях на статоре располагается вспомогательная (пусковая) обмотка под углом 90° по отношению к рабочей обмотке статора, причем вспомогательная обмотка при пуске подключается к сети.

Для сдвига фазы тока в цепь вспомогательной обмотки включается индуктивность или емкость.


Фиг. 28.



Фиг. 29.

Однофазные конденсаторные двигатели. Для улучшения рабочих и пусковых характеристик однофазные асинхронные двигатели иногда снабжаются конденсатором, который включается в цепь поперечной обмотки (фиг. 29).

В этом случае поперечная обмотка и конденсатор остаются включенными в сеть и в рабочем режиме.

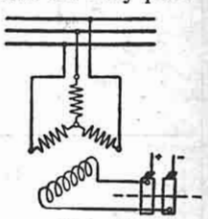
Рабочие характеристики конденсаторных двигателей приближаются к характеристикам трехфазных асинхронных двигателей.

СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Скорость вращения синхронного электродвигателя не зависит от нагрузки и точно определяется числом пар полюсов его p и частотой сети f [см. формулу (9) стр. 394].

Устройство. Обмотка статора — трехфазная, распределенная, располагается в пазах статора. Предназначена для приключения к питающей (трехфазной) сети.

Обмотка возбуждения — катушечная, расположена на роторе и питается постоянным током. На валу ротора имеются два кольца для подвода постоянного тока к обмотке возбуждения.


Фиг. 30.

Принципиальная схема синхронной машины дана на фиг. 30.

Пусковая обмотка (беличья клетка) — короткозамкнутая; стержни ее закладываются в пазы полюсных башмаков и замыкаются с торцов сегментами. Служит для пуска синхронных двигателей.

Возбудитель — генератор постоянного тока, служащий для питания обмотки ротора; часто насаживается на вал двигателя. Для возбуждения тихоходных двигателей применяется отдельный возбудительный двигатель-генератор.

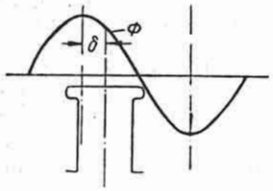
Сердечник статора двигателя собирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*. Ротор имеет явно выраженные полюсы (за исключением двигателей на $n_c = 3000$ об/мин), которые составляются из листов стали толщиной 1 *мм*.

Выводы обмотки возбуждения (индуктора) синхронных машин имеют обозначения: начало — И1, конец — И2.

Обозначения выводов статорной обмотки такие же, как и для асинхронных двигателей (см. табл. 9).

Принцип действия. Трехфазная обмотка статора, приключенная к сети, создает *вращающееся поле*, скорость вращения которого определяется формулой (9). Если возбужденный ротор имеет то же число оборотов в минуту (т. е. вращается с синхронной скоростью

и в том же направлении), то он займет определенное положение по отношению к вращающемуся полю статора. При холостом ходе двигателя это положение характеризуется тем, что оси полюсов ротора и вращающегося поля Ф статора будут совпадать (угол между осями $\delta = 0$, фиг. 31), причем это будет соответствовать минимальному току в статоре (при заданном возбуждении). Если



Фиг. 31.

к валу двигателя приложить тормозящий момент, ротор отстанет от поля на некоторый угол δ. Между отставшим полюсом ротора и вращающимся полем статора возникнет упругая сила, которая будет увеличиваться с увеличением δ. Когда упругая сила сделается равной тормозящей силе, дальнейшее отставание ротора прекратится, и он станет вращаться синхронно с полем. Если момент на валу достигнет такой величины, что он преодолеет максимальную упругую силу, которую могут развить поле и возбужденный ротор (при $\delta \approx 90°$), то двигатель выпадет из синхронизма.

Векторная диаграмма синхронного двигателя. Уравнение для обмотки статора синхронной машины в синхронном режиме (без учета активного сопротивления r этой обмотки и если считать воздушный зазор машины равномерным) будет

$$\dot{U} - \dot{E}_d = \sqrt{3} j \dot{I} x_d. \qquad (11)$$

Обозначения: $\dot{U}$ — вектор линейного напряжения в $в$; $\dot{E}_d$ — вектор линейной э. д. с. в $в$, наведенной потоком возбуждения ротора в обмотке якоря (э. д. с. пропорциональна току возбуждения, если пренебречь насыщением магнитной цепи); $\dot{I}$ — вектор линейного тока в $а$; x_d — синхронное реактивное сопротивление в $ом$, отнесенное к одной фазе якоря (внутреннее сопротивление машины); j — оператор поворота вектора на угол $\frac{\pi}{2}$ в положительном направлении (против часовой стрелки) на векторной диаграмме.

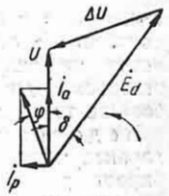
Из уравнения (11) следует

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} - \dot{E}_d}{j\sqrt{3}x_d} = -j\frac{\Delta U}{\sqrt{3}x_d},$$

т. е. вектор тока отстает по фазе от результирующего напряжения ΔU, действующего в обмотке якоря, на угол $\frac{\pi}{2}$.

На фиг. 32 построена векторная диаграмма синхронной машины для двигательного режима ($\dot{E}_d$ отстает от $\dot{U}$). Угол δ определяется нагрузкой на валу двигателя.

При холостом ходе, если пренебречь потерями, $\delta = 0$. При номинальной нагрузке $\delta \approx 30°$ (в зависимости от параметров двигателя). Максимальный момент двигателя соответствует углу $\delta = \frac{\pi}{2}$.



Фиг. 32.

В генераторном режиме вектор э. д. с. $\dot{E}_d$ опережает вектор напряжения $\dot{U}$.

Ток статора I имеет активную составляющую I_a относительно вектора напряжения $\dot{U}$

$$I_a = I \cos\varphi$$

и реактивную составляющую

$$I_p = I \sin\varphi.$$

Мощность P, забираемая двигателем из сети,

$$P = \sqrt{3} U I_a \ вт.$$

Реактивная мощность Q, отдаваемая двигателем (при перевозбуждении — см. дальше),

$$Q = \sqrt{3} U I_p \ вар.$$

Режим перевозбуждения имеет место при

$$E_d \cos\delta > U.$$

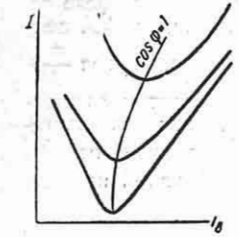
При недовозбуждении

$$E_d \cos\delta < U.$$

Рабочий режим. Мощность, забираемая двигателем из сети,

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi \ вт.$$

U-образные характеристики дают зависимость тока двигателя I от тока возбуждения $i_в$ при постоянном моменте на валу (фиг. 33). Изменение тока возбуждения не может изменить скорости вращения двигателя, а влияет только на величину тока двигателя, именно — на его реактивную составляющую.



Фиг. 33.

Перевозбужденный режим двигателя (правые ветви кривых на фиг. 33) характеризуется тем, что двигатель отдает реактивную мощность в сеть. При постоянном моменте на валу реактивная мощность, отдаваемая двигателем, тем больше, чем больше ток возбуждения.

Недовозбужденный режим характеризуется тем, что двигатель забирает реактивную мощность из сети (левые ветви кривых на фиг. 33).

Нормально синхронные двигатели строятся для работы при номинальной нагрузке с $\cos\varphi = 1$ или $\cos\varphi = 0{,}7 \div 0{,}9$ (в перевозбужденном режиме).

Зависимость мощности двигателя от угла δ определяется формулой

$$P = \frac{UE_d}{x_d}\sin\delta \ вт.$$

Максимальная мощность при плавном увеличении нагрузки определяется формулой

$$P_{max} = \frac{UE_d}{x_d} \ вт,$$

т. е. максимальная мощность синхронного двигателя зависит от напряжения сети в первой степени и пропорциональна току возбуждения.

Согласно ГОСТ 183-41 кратность максимального вращающего момента синхронного двигателя с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0{,}8$ (при опережающем токе, т. е. в перевозбужденном режиме) по отношению к номинальному вращающему моменту должна быть не ниже 1,65 (при номинальных значениях напряжения, частоты и тока возбуждения).

При внезапном изменении нагрузки на валу возникают *колебания* двигателя, которые быстро затухают благодаря потерям в демпферной клетке (пусковой обмотке).

Пусковые характеристики. Синхронный двигатель пускается как асинхронный, т. е. при пуске ротор не возбуждается постоянным током, а вращающий момент создается взаимодействием токов обмотки статора и пусковой обмотки, причем ток в пусковой обмотке создается благодаря трансформаторной связи обеих упомянутых обмоток.

Основные параметры при асинхронном пуске синхронного двигателя следующие.

Начальный пусковой момент — момент, который развивает двигатель при неподвижном роторе. Величина пускового момента сильно зависит от материала и конструкции пусковой обмотки.

Начальный пусковой ток — ток двигателя при неподвижном роторе. Величина его дается в каталогах по отношению к номинальному току двигателя и относится к полному напряжению.

Входной момент — момент двигателя при скольжении $s = 5\%$, т. е. при 95% синхронной скорости. Этот момент характеризует способность двигателя к вхождению в синхронизм после подачи возбуждения.

В случае пуска при пониженном напряжении пусковой и входной моменты изменяются пропорционально квадрату пускового напряжения, а пусковой ток в *двигателе* — пропорционально первой степени напряжения.

Требуемое соотношение между начальным пусковым моментом и входным моментом определяется типом привода. Например, для вентиляторов

$$M_{пуск} \approx 0{,}2M_{ном};\ M_{вх} = M_{ном}.$$

Для нерегулируемого прокатного стана

$$M_{пуск} = 0{,}5M_{ном};\ M_{вх} = (0{,}5 \div 1)\,M_{ном}.$$

В табл. 15 приведены технические данные синхронных электродвигателей серии МС-320 на напряжение 3000 *в*. Двигатели той же серии строятся также на напряжение 6000 *в*.

Таблица 15

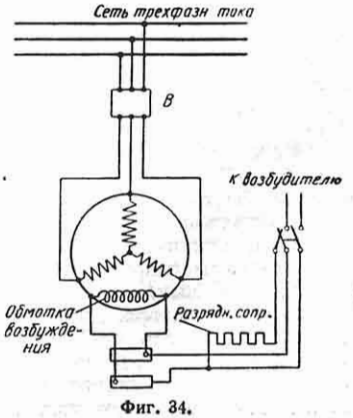
Технические данные синхронных двигателей серии МС-320 на 3000 *в*

Скорость в об/мин		1000	750	600	500	375	300	250	187	167	150	125
Пределы мощности в *квт*	от	640	380	300	240	140	195	135	125	305	240	115
	до	1920	1900	2670	2880	1700	1700	1120	700	555	390	205
К. п. д. в %	от	93,6	92,2	91,4	90,7	88,1	88,0	85,4	83,0	87,1	86,6	80,9
	до	95,7	95,2	95,4	95,9	95,1	94,6	93,6	91,6	89,9	88,9	85,0
$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	от	3,8	4,30	3,9	3,8	3,5	3,3	3,3	3,0	3,5	3,4	3,3
	до	5,3	5,3	5,3	5,3	4,4	4,6	4,0	4,2	4,1	3,6	3,5
$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	от	1,0	0,80	0,70	0,80	0,70	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	до	0,8	1,0	1,0	1,0	0,85	0,85					
$\frac{M_{вход}}{M_{ном}}$	от	0,70	0,80	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
	до	0,90		0,80	0,80	0,75	0,70					
$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$ (в синхронном режиме)	от	2,1	2,2	2,4	2,2	2,2	2,4	2,4	2,6	3,0	2,9	3,10
	до		2,4	2,6	2,5	2,5	2,6	2,9	2,7	3,1		
Напряжение возбуждения в *в*	от	40	50	55	55	65	110	110	110	110	110	110
	до	65	65	110	110	110						
Мощность возбуждения в *квт*	от	13,1	10,8	11,7	10,3	8,2	12,0	11,3	15,4	24,7	19,2	15,5
	до	21,9	26	45,0	43,7	31,8	38,0	35,2	32,3	35,0	25,2	22,4
Вес на единицу момента в *кГ/кГм*	от	8,5	10,2	10,0	10,4	12,2	9,7	12,3	12,1	6,0	6,35	10,2
	до	6,0	5,5	4,5	4,1	4,5	4,15	3,65	4,0	4,45	4,7	7,0

Примечание. Пределы величины к. п. д., напряжения и мощности возбуждения, веса на единицу момента соответствуют пределам мощности (верхняя цифра — верхней цифре, нижняя цифра — нижней цифре) в графе „Пределы мощности". Значения пусковых токов и моментов выражены в долях номинальных величин. В таблице указаны крайние предельные значения, встречающиеся в данном интервале мощностей.

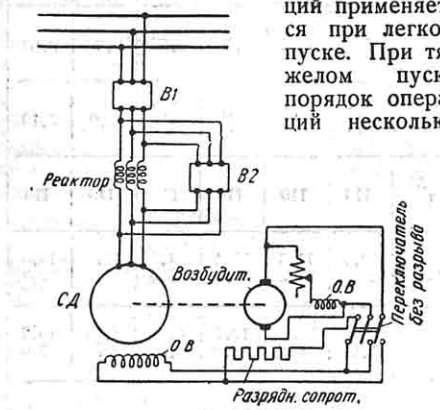
Пусковые схемы. Пуск при полном напряжении. Наиболее простая схема получается при пуске двигателя от полного напряжения (фиг. 34), когда требуется один выключатель. Обмотка возбуждения во избежание пробоя ее изоляции замыкается при пуске на разрядное сопротивление, равное примерно 10-кратному сопротивлению самой обмотки. Когда двигатель достигает подсинхронной скорости, ему дается возбуждение, и он входит в синхронизм. После подачи возбуждения разрядное сопротивление отключается.

Если по условиям сети (большое падение напряжения при пуске) или по требованию привода (уменьшение пускового момента) пуск при полном напряжении недопустим, двигатель пускается при пониженном напряжении через реактор или автотрансформатор.



Фиг. 34.

Пуск через реактор. Принципиальная схема дана на фиг. 35. Пуск через реактор требует двух выключателей. Порядок операций при пуске через реактор следующий. Обмотка возбуждения включается на разрядное сопротивление. Включается главный выключатель *B1*, и двигателю дается напряжение через реактор (*B2* разомкнут). По достижении скорости, близкой к синхронной, двигателю дается возбуждение. После вхождения двигателя в синхронизм воздействием на шунтовой реостат возбудителя устанавливается минимальный ток в статоре, включается выключатель *B2*, и двигатель получает полное напряжение. Устанавливается номинальное возбуждение. Такой порядок операций применяется при легком пуске. При тяжелом пуске порядок операций несколько

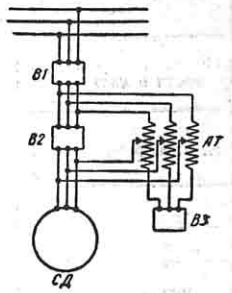


Фиг. 35.

изменяется. Сначала двигатель получает полное напряжение замыканием выключателя *B2*, а затем уже ему дается возбуждение.

При пуске через реактор пусковой момент снижается пропорционально квадрату напряжения, пусковой ток в двигателе и сети — пропорционально первой степени напряжения на двигателе.

Пуск через автотрансформатор. Одна из схем приведена на фиг. 36. Здесь требуются три выключателя. Порядок операций при легком пуске следующий. Обмотка возбуждения включается на разрядное сопротивление. Включается выключатель *B3* в нуле автотрансформатора. Включается линейный выключатель *B1*, и двигатель получает частичное напряжение. По достижении подсинхронной скорости двигателю дается возбуждение. После вхождения в синхронизм размыкается выключатель *B3*, и двигатель работает через реактор. Включается выключатель *B2*, и двигатель получает полное напряжение.



Фиг. 36.

При пуске через автотрансформатор пусковой момент двигателя и пусковой ток в сети уменьшаются пропорционально квадрату пускового напряжения, а пусковой ток в самом двигателе — пропорционально первой степени напряжения.

Пуск синхронных двигателей обычно автоматизируется.

Область применения и эксплуатационные свойства синхронных двигателей. Синхронные двигатели применяются для приводов, не требующих регулирования скорости, как, например, для привода насосов, вентиляторов, компрессоров, нерегулируемых прокатных станов, в преобразовательных установках (двигатель-генераторы) и т. д. Синхронный двигатель является рентабельным при мощностях примерно 70 — 100 *квт* и выше.

Основное преимущество синхронного двигателя перед асинхронным заключается в том, что он не является потребителем реактивной мощности, т. е. работает с $\cos\varphi = 1$ или даже с опережающим током.

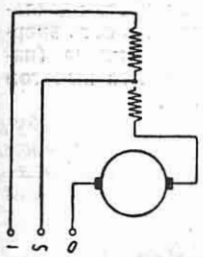
Другие преимущества синхронного двигателя перед асинхронным: 1) синхронный двигатель имеет больший воздушный зазор и потому более надежен в механическом отношении; 2) синхронный двигатель, построенный на $\cos\varphi = 1$, имеет более высокий к. п. д.; 3) синхронные двигатели могут быть построены на более низкую скорость вращения, при которой асинхронные двигатели являются нерентабельными; 4) максимальный момент синхронного двигателя зависит от напряжения в первой степени, тогда как для асинхронного двигателя эта зависимость является квадратической; поэтому синхронный двигатель является более устойчивым при колебаниях напряжения сети; 5) синхронный двигатель может быть построен для высоких значений максимального вращаю-

щего момента (3—4-кратный по отношению к номинальному).

Недостатки синхронных двигателей — несколько более сложное управление пуском (обычно автоматизированное) и более сложный уход (ввиду наличия коллекторных возбудителей и более сложной станции управления) — при современной высокой квалификации обслуживающего персонала не являются существенными.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

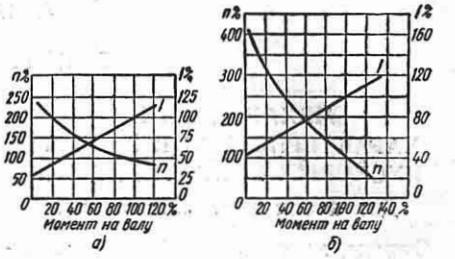
Универсальные электродвигатели небольшой мощности от 5 до 100 *вт* и для напряжений 110 и 220 *в* применяются в различных областях промышленности. Они могут работать как от сети переменного тока, так и от сети постоянного тока (отсюда название „универсальные двигатели").



Фиг. 37.

Универсальный электродвигатель является *коллекторным* двигателем с сериесным возбуждением. Он имеет ту же конструкцию, что и нормальная машина постоянного тока, за исключением того, что статор его собирается из листовой электротехнической стали.

Схема двигателя представлена на фиг. 37. Обозначения выводов двигателя: *О* — общий зажим; —— зажим для приключения на постоянный ток; ~ — зажим для приключения на переменный ток.



Фиг. 38.

Характеристики $n = \varphi(M)$ и $I = \psi(M)$ универсального электродвигателя при работе от постоянного и переменного напряжений соответственно представлены на фиг. 38, *а* и *б*. Двигатель имеет сериесную характеристику, т. е. скорость вращения его сильно снижается с увеличением нагрузки.

В табл. 16 приведены технические данные увиверсальных электродвигателей серии УМТ.

Таблица 16

Технические данные универсальных электродвигателей

Тип	Номинальная мощность на валу в *вт*	Номинальная скорость вращения в об/мин	Переменный ток		Постоянный ток		Вес в *кГ*	Маховой момент якоря в *кГсм²*
			Напряжение в *в*	Максимальная сила тока в *а*	Напряжение в *в*	Максимальная сила тока в *а*		
УМТ-11	5±1	3000	127	0,35	110	0,25	2,2	1,5
УМТ-12	10±2	2000	127	0,5	110	0,4	2,7	2,3
УМТ-21	25±5	1800	127	1,15	110	0,7	4,6	12,0
УМТ-22	55±8	2500	127	1,65	110	1,2	5,6	18,0

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Касаткин А. С., Перекалин М. А., Сергеев П. С. Электротехника, Энергоиздат, 1953.

2. Каталоги электрических машин Министерства электропромышленности.

3. Костенко М. П., Электрические машины, Энергоиздат, 1944.

4. Петров Г. Н., Горохов Н. В. и др., Электрические машины, ч. I, Энергоиздат, 1940.

5. Петров Г. Н., Электрические машины, ч. II, Энергоиздат, 1947.

6. Стандарты общесоюзные по электрическим машинам.

7. Пиотровский Л. М., Электрические машины, Энергоиздат, 1950.

ГЛАВА XIV

ЭЛЕКТРОПРИВОД

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Двигатели постоянного тока

Определения. Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость скорости его вращения от развиваемого им вращающего момента на валу.

Механическая характеристика называется естественной в том случае, если двигатель подключен к сети с номинальными параметрами и в цепи его отсутствуют внешние сопротивления.

Механические характеристики называются искусственными, если в цепях двигателя включены внешние сопротивления.

Номинальное сопротивление двигателя постоянного тока

$$R_н = \frac{U_н}{I_н}, \qquad (1)$$

где $U_н$ и $I_н$ — номинальные напряжения и ток двигателя.

Режимы. Электродвигатель может создавать движущий или тормозной момент. В современном электроприводе находят применение следующие виды электрического торможения:

Торможение противовключением; в этом случае энергия передается от рабочей машины к двигателю и заставляет его вращаться в направлении, противоположном тому, которое соответствует направлению развиваемого двигателем момента. Кинетическая энергия рабочей машины расходуется на нагрев обмоток двигателя и добавочных сопротивлений.

Динамическое торможение; двигатель в этом случае работает как генератор с самовозбуждением или независимым возбуждением, превращая энергию, получаемую от рабочей машины, в тепло, выделяющееся в обмотках двигателя и сопротивлениях.

Генераторное торможение с возвратом (рекуперацией) энергии в сеть. Двигатель, вращаясь со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода, отдает в сеть энергию, получаемую им от механизма (например, при спуске грузов), за вычетом потерь в самом двигателе.

Двигатели параллельного возбуждения. Зависимость скорости вращения двигателя параллельного возбуждения от тока главной цепи при $\Phi = \text{const}$ выражается уравнением

$$n = n_0 - n_0 \frac{R}{U_н} I. \qquad (2)$$

Здесь n_0 — скорость вращения при идеальном холостом ходе (при $I = 0$) в об/мин; R — полное сопротивление цепи якоря внешнее и внутреннее (в омах).

Механическая характеристика выразится уравнением

$$n = n_0 - n_0 \frac{R}{R_н M_н} M. \qquad (3)$$

Здесь $M_н$ — номинальный момент двигателя в *кГм*, рассчитываемый по формуле

$$M_н = 975 \frac{P_н}{n_н}, \qquad (3')$$

где $P_н$ — номинальная мощность двигателя (на валу), выраженная в *квт*; $n_н$ — номинальное число об/мин.

Уравнения (2) и (3) справедливы для всех режимов работы двигателя. Для противовключения второй член правой части обоих уравнений больше n_0 и $n < 0$; для рекуперации I и M отрицательны и $n > n_0$; для динамического торможения скорость идеального холо-

стого хода этого режима равна нулю ($U = 0$), и уравнение (3) принимает вид

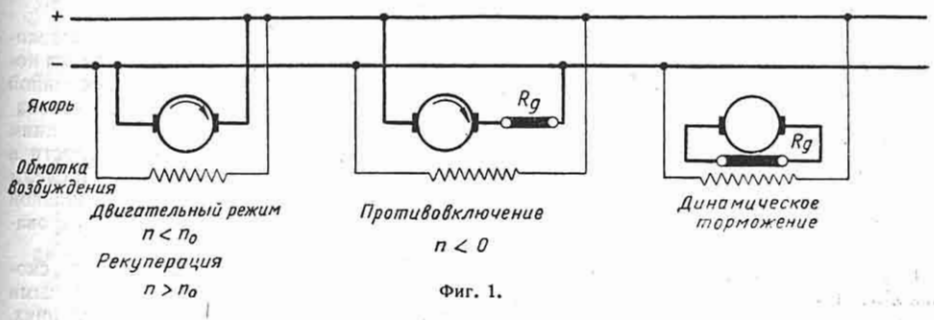
$$n = n_0 \frac{R}{K_н M_н} M. \qquad (4)$$

На фиг. 1 приведены схемы включения обмоток двигателя при разных режимах, а на фиг. 2 — соответствующие механические характеристики. Чем больше сопротивление R цепи якоря, тем круче идут характеристики.

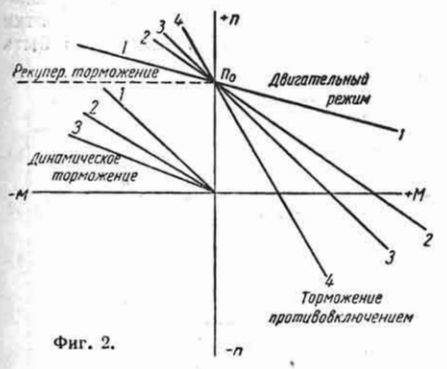
Здесь $R_я$ — сопротивление якоря, которое ориентировочно может быть определено по формуле

$$R_я = \frac{U_н}{I_н} \cdot \frac{n_0 - n_н}{n_0} = \frac{1 - \eta_н}{2} \cdot \frac{U_н}{I_н}, \qquad (6)$$

где $\eta_н$ — к. п. д. двигателя при номинальной нагрузке.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Низкие устойчивые скорости, необходимые для точной остановки многих механизмов и для выполнения некоторых производственных операций, получаются при использовании схемы шунтирования якоря электродвигателя (фиг. 3).

Уравнение механической характеристики для этого случая имеет вид

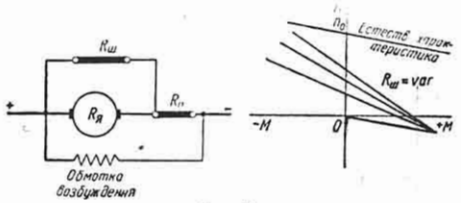
$$n = n_0 \frac{R_ш}{R_ш + R_п} - \frac{n_0 I_н}{M_н U_н} \times$$

$$\times \left(R_я + \frac{R_ш R_п}{R_ш + R_п} \right) M. \qquad (5)$$

При пуске, торможении, регулировании скорости и реверсировании электродвигателя постоянного тока происходит переход с одной механической характеристики на другую.

Для расчета пусковых сопротивлений необходимо задаться или определить минимальный пусковой ток или момент, максимальный пусковой ток или момент и число пусковых ступеней.

При нормальном пуске (частота включений двигателя невелика) задаются минимальным пусковым моментом M_2, величину которого выбирают на 10—20% больше статического момента. При форсированном пуске (частота включений



Фиг. 3.

двигателя большая) задаются максимальным пусковым моментом M_1, величина которого выбирается близкой к предельно допустимой. Для двигателей кранового типа предельная величина момента равна $\sim 2{,}5 M_н$; для двигателей общепромышленного типа (серия ПН) этот момент равен около $2M_н$.

Число пусковых ступеней m обычно определяется применяемой аппаратурой управления (магнитной станцией, пусковым реостатом).

Обозначим

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \frac{I_1}{I_2}, \qquad (7)$$

тогда при заданных I_1 и m находится

$$I_2 = I_1 \sqrt[m]{\frac{r_\partial I_1}{U_н}}, \qquad (8)$$

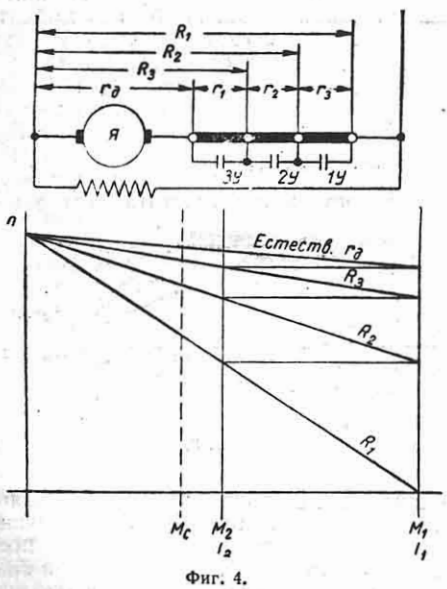
при заданных I_2 и m

$$I_1 = I_2 \sqrt[m+1]{\frac{U_н}{r_\partial I_2}}. \qquad (9)$$

При заданных I_1 и I_2 число ступеней m находится из выражения

$$m = \frac{\lg \frac{U_н}{r_\partial I_1}}{\lg \lambda}. \qquad (10)$$

На фиг. 4 приведена схема и пусковая диаграмма для двигателя параллельного возбуждения. Там же даны принятые обозначения сопротивлений.



Фиг. 4.

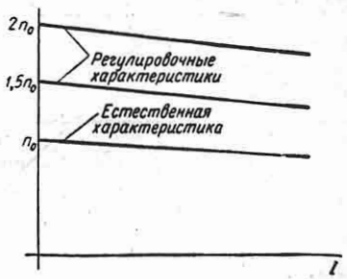
Величины пусковых сопротивлений определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= r_\partial(\lambda - 1);\\ r_2 &= r_1\lambda;\\ r_3 &= r_2\lambda = r_1\lambda^2;\\ &\cdots\cdots\cdots\\ r_m &= r_{m-1}\lambda = r_1\lambda^{m-1}. \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

Скорость вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения может регулироваться вниз от основной включением сопротивлений последовательно в цепь якоря. Практически таким путем могут быть получены скорости в 2—2,5 раза меньше основной. Пределы регулирования скорости вниз от основной могут быть увеличены при шунтировании якоря.

Эти способы регулирования скорости сопряжены со значительными потерями энергии в сопротивлениях. Мощность двигателя при этом пропорциональна его скорости.

Регулирование скорости двигателя вверх от основной производится путем ослабления его магнитного потока включением сопротивлений в цепь обмотки возбуждения. Таким путем могут быть

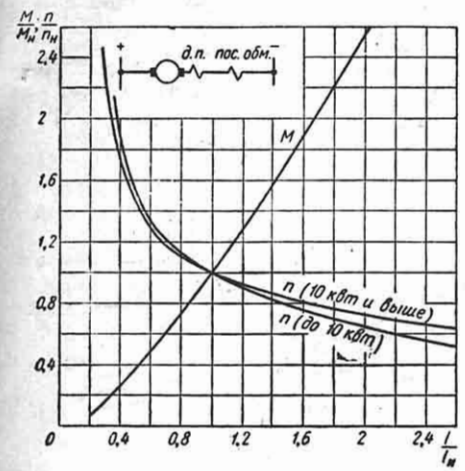


Фиг. 5.

достигнуты пределы регулирования скорости до 1 : 4. Мощность двигателя при всех скоростях выше основной остается постоянной. Этот способ регулирования скорости очень экономичен. Он не сопровождается какими-либо дополнительными потерями энергии. На фиг. 5 приведены механические характеристики при регулировании скорости вверх от основной.

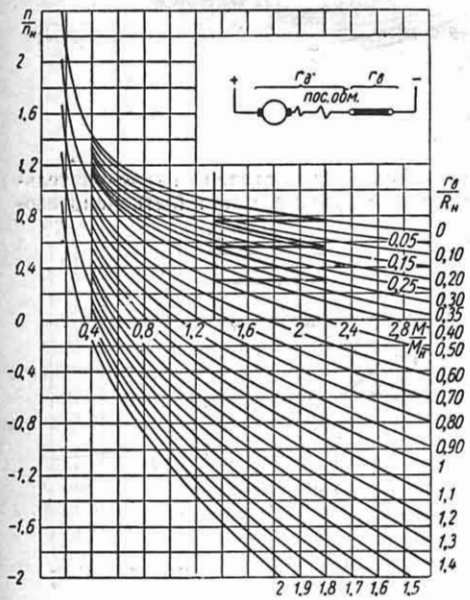
Двигатели последовательного возбуждения. Характеристики двигателя последовательного возбуждения задаются обычно графически. Так, на фиг. 6 приве-

дены универсальные характеристики $M=f(I)$ и $n=f_1(I)$ двигателей последовательного возбуждения металлургической серии МП.



Фиг. 6.

На фиг. 7 приведены универсальные механические характеристики для двигателей той же серии. По оси ординат



Фиг. 7.

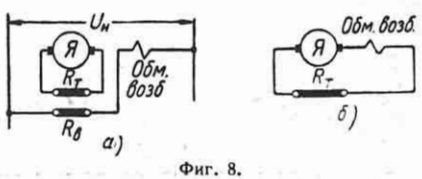
отложены скорости вращения в относительных единицах, по оси абсцисс — моменты в относительных единицах. Против каждой характеристики поставлено значение внешнего сопротивления в относительных единицах, для которого она рассчитана.

Внутреннее сопротивление двигателя последовательного возбуждения может быть ориентировочно определено по формуле

$$r_д = R_я + R_в = 1{,}5R_я = \frac{0{,}75\,(1-\eta_н)}{I_н}\,U_н. \quad (12)$$

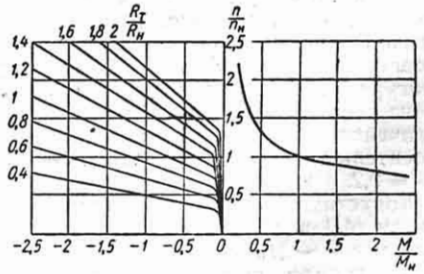
При нормальной схеме включения обмоток двигатель последовательного возбуждения может работать в двигательном режиме или в режиме торможения противовключением. Режим генераторного торможения с рекуперацией энергии в сеть в этом случае невозможен. Динамическое торможение возможно как по схеме с независимым возбуждением (фиг. 8, *а*), так и с самовозбуждением (фиг. 8, *б*).

Характеристики схемы с независимым возбуждением ничем не отличаются от характеристик динамического торможения двигателей параллельного возбуждения. Для схемы с самовозбуждением характеристики приведены на фиг. 9.



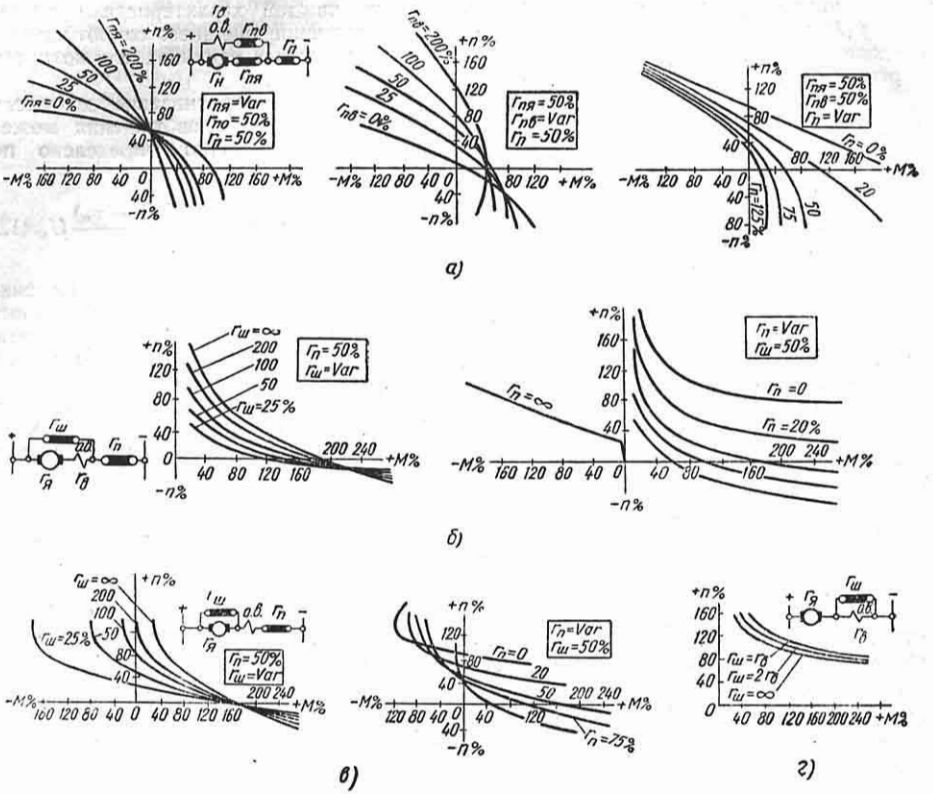
Фиг. 8.

При искусственных схемах включения двигатель последовательного возбуждения может дать огромное разнообразие



Фиг. 9.

характеристик. На фиг. 10, *а* — *г* приведены некоторые принципиальные схемы включения обмоток двигателя и внешних сопротивлений и соответствующие этим схемам механические характеристики.

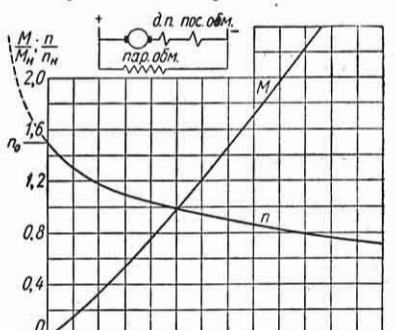


Фиг. 10.

Для расчета пусковых сопротивлений могут быть использованы универсальные механические характеристики, фиг. 7. Например, для получения начального пускового момента $M_1 = 2M_н$ необходимо внешнее сопротивление, равное $0{,}54R_н$ (находится путем интерполяции характеристик для $0{,}5R_н$ и $0{,}6R_н$). На этой же фигуре более толстыми линиями начерчена пусковая диаграмма и определены значения пусковых сопротивлений. В относительных единицах $r_1 = 0{,}13$; $r_2 = 0{,}17$; $r_3 = 0{,}2$.

Допустимый ток при пуске двигателей серии МП последовательного возбуждения равен $\sim 3I_н$.

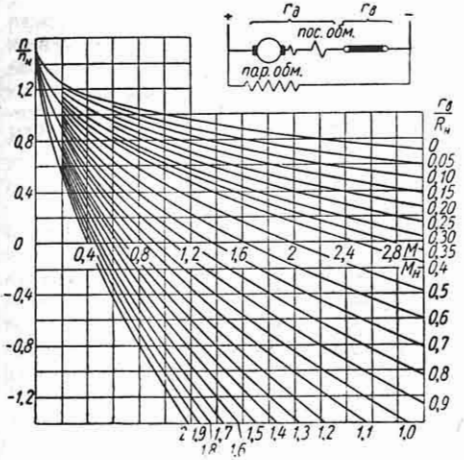
Двигатели смешанного возбуждения. На фиг. 11 приведены универсальные характеристики двигателей смешанного возбуждения металлургической серии МП, а на фиг. 12 — универсальные механические характеристики той же серии. Эти характеристики, аналогично характеристикам двигателей последовательного возбуждения, могут быть использо-



Фиг. 11.

ваны для расчета пусковых сопротивлений и сопротивлений противовключения.

Заметим, что для двигателей смешанного возбуждения часто применяется динамическое торможение только на шунтовом поле с отключенной последовательной обмоткой, что упрощает схему



Фиг 12.

и ведет к уменьшению количества необходимой аппаратуры. Связь между тормозным моментом M_T и током якоря для этого случая торможения I_T устанавливается формулой

$$M_T = 0{,}975 \frac{U_н}{n_0} I_T. \qquad (13)$$

Внутреннее сопротивление двигателя смешанного возбуждения ориентировочно может быть определено по формуле

$$r_д = \frac{0{,}6\,(1 - \eta_н)}{I_н} U_н. \qquad (14)$$

Допустимый ток при пуске двигателей серии МП смешанного возбуждения равен $\sim 2{,}7 I_н$.

Асинхронные электродвигатели

Для асинхронных электродвигателей с фазовым ротором вводится понятие номинального сопротивления ротора:

$$R_{2н} = \frac{U_{2н}}{\sqrt{3} I_{2н}}, \qquad (15)$$

где $U_{2н}$ — номинальное напряжение между кольцами ротора; $I_{2н}$ — номинальный ток ротора.

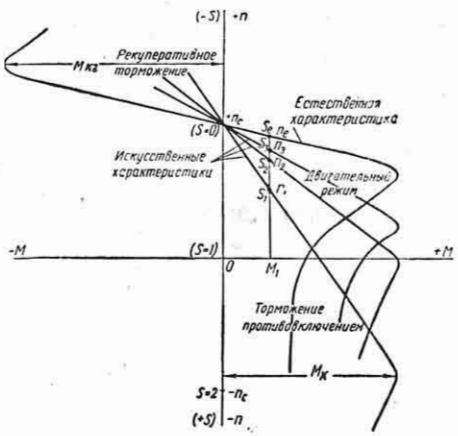
Для асинхронных электродвигателей возможны те же тормозные режимы, что и для двигателей постоянного тока параллельного возбуждения.

Торможение противовключением получается при условии вращения ротора в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля.

Динамическое торможение может быть получено при отключении статора от сети и питании его постоянным током. В цепь ротора двигателя с фазовым ротором могут быть включены сопротивления.

Генераторное торможение с рекуперацией энергии в сеть получается при условии вращения ротора в сторону поля со скоростью, превышающей синхронную.

На фиг. 13 приведены механические характеристики асинхронного двигателя с фазовым ротором для двигательного режима и режимов противовключения и рекуперативного торможения. В пределах от $M = 0$ до $M \approx 0{,}75 M_к$ можно



Фиг. 13.

принимать, что механическая характеристика асинхронного двигателя подчиняется линейной зависимости

$$M = \frac{M_н}{s_н} s, \qquad (16)$$

где $s = \dfrac{n_c - n}{n_c}$ — скольжение двигателя при данной скорости вращения ротора n об/мин (часто выражают скольжение в %: $s\% = \dfrac{n_c - n}{n_c} 100$); $s_н = \dfrac{n_c - n_н}{n_c}$ —

номинальное скольжение двигателя при номинальной нагрузке его.

Для расчета полной механической характеристики можно пользоваться приближенным уравнением

$$\frac{M}{M_к} = \frac{2}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s}}, \qquad (17)$$

где

$$s_к = s_н\left(\mu_к + \sqrt{\mu_к^2 - 1}\right). \qquad (18)$$

Здесь $M_к$ и $s_к$ — критические момент и скольжение; $\mu_к = \frac{M_к}{M_н}$; M и s — текущие значения момента и скольжения.

Уравнение (17) дает удовлетворительные результаты в пределах величины скольжений от $s = 0$ до $s = s_к$.

Ниже приводится уточненное расчетное уравнение для двигателей малой и средней мощности:

$$M = \frac{2M_к(1+\varepsilon)}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s} \pm 2\varepsilon}. \qquad (19)$$

Знак плюс относится к двигательному, а знак минус — к генераторному режимам.

В уравнении (19)

$$\varepsilon \approx 5s_н; \qquad (20)$$

$$s_к = s_н\left\{[\mu_к + (\mu_к - 1)\,\varepsilon] + \right.$$

$$\left. + \sqrt{[\mu_к + (\mu_к - 1)\,\varepsilon]^2 - 1}\right\}. \qquad (21)$$

Обозначим s_1, s_2, s_3 (фиг. 13) скольжения двигателя при постоянном моменте M_1 и при разных сопротивлениях роторной цепи R_1, R_2, R_3...; s_e — скольжение двигателя при том же моменте, но при работе на естественной характеристике (т. е. при закороченных кольцах ротора, когда сопротивление роторной цепи равно R_p).

Скольжение s_x на искусственной характеристике, соответствующей включению в цепь ротора внешнего сопротивления R_x, для любого значения момента может быть получено по формуле

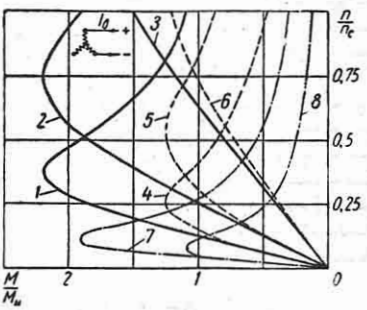
$$s_x = s_e\frac{R_p + R_x}{R_p}. \qquad (22)$$

Сопротивление ротора R_p может быть подсчитано по приближенной формуле

$$R_p = s_н R_{2н} = s_н\frac{U_{2н}}{\sqrt{3}I_{2н}}. \qquad (23)$$

Чем большее сопротивление включено в цепь ротора, тем круче характеристики.

На фиг. 14 представлены универсальные механические характеристики динамического торможения для крановo-металлургических двигателей МТ и МТК

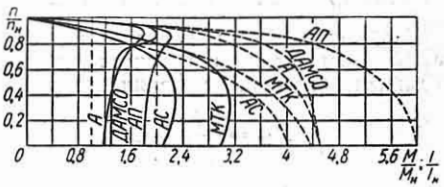


№ кривых	1	2	3	4	5	6	7	8
Двигатель	МТ с фазовым ротором						МТ с к. з. ротором $s_н = 0{,}08$	
Ток возбуждения $I_в/I_{oxx}$	3			2			3	2
Сопротивление ротора $R_{рот}/R_{2н}$	0,2	0,4	1,0	0,2	0,4	1,0		

Фиг. 14.

Характеристики двигателя МТК построены, для номинального скольжения $s_н = 0{,}08$. Для двигателей с номинальным скольжением, отличным от 0,08, скорости при данных относительных моментах должны быть изменены соответственно отношению скольжений.

На фиг. 15 приведены механические характеристики и кривые зависимости



Фиг. 15.

скорости от тока для разных типов двигателей с короткозамкнутым ротором.

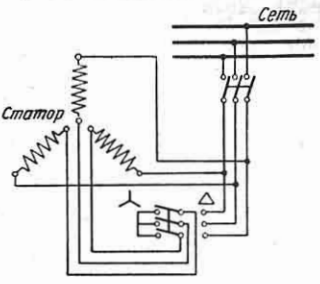
Пуск асинхронных двигателей. Пуск двигателей с фазовым ротором. Для увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока в цепь ротора при пуске двигателя вводится реостат (см. фиг. 20). Введением реостата в цепь ротора величина начального пускового момента $M_п$ может быть увеличена вплоть до максимального момента $M_к$.

По мере увеличения скорости двигателя реостат выводится, и по окончании пуска обмотка ротора замыкается накоротко.

Прямой пуск короткозамкнутых двигателей. Короткозамкнутые асинхронные двигатели обычно пускаются непосредственно от сети на полное напряжение. Начальный пусковой момент $M_п$ и начальный пусковой ток $I_п$ короткозамкнутых двигателей при пуске под полным напряжением колеблются в зависимости от синхронной скорости вращения, мощности и формы исполнения ротора.

Прямой пуск крупных двигателей ограничивается мощностью трансформаторов.

Пуск переключением со звезды на треугольник. Короткозамкнутые двигатели, если они нормально работают при соединении обмоток статора в треугольник, могут пускаться для понижения пускового тока переключением со звезды на треугольник (фиг. 16). Для пуска обмотка статора пересоединяется на звезду. При этом пусковое напряжение на фазу уменьшается в $\sqrt{3}$ раз.



Фиг. 16.

Пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшается в 3 раза:

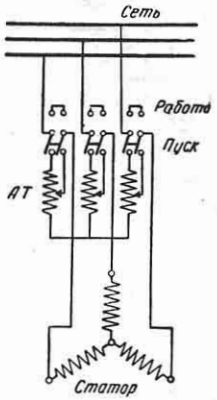
$$\frac{M_\lambda}{M_\Delta} = \frac{1}{3}.$$

Пусковой ток в линии уменьшается также в 3 раза:

$$\frac{I_\lambda}{I_\Delta} = \frac{1}{3}.$$

По окончании пуска обмотка статора переключается на нормальное соединение — треугольником.

Пуск через автотрансформатор. Асинхронные двигатели большой мощности, если непосредственный пуск их от сети по каким-либо причинам недопустим, могут пускаться через автотрансформатор (фиг. 17). Пусковое напряжение при этом может быть произвольно понижено.

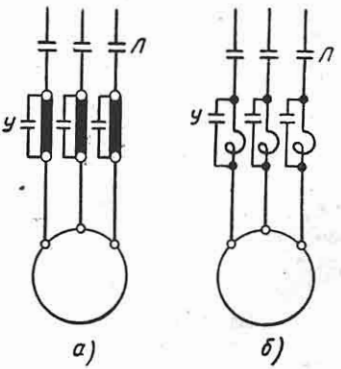


Фиг. 17.

Пусковой момент двигателя и пусковой ток в сети при пуске через автотрансформатор понижаются пропорционально квадрату пускового напряжения:

$$\frac{M_{п.тр}}{M_п} = \frac{I_{п.тр}}{I_п} = \left(\frac{U_{тр}}{U_п}\right)^2.$$

Пуск через сопротивление в цепи статора. Сопротивление может быть активным (фиг. 18, *а*) или реактивным (реакторный пуск) (фиг. 18, *б*).

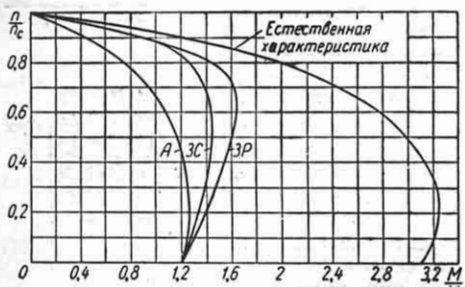


Фиг. 18.

При пуске сопротивление включено в статор. При этом напряжение на зажимах статора и пусковой ток снижаются

Пусковой момент снижается пропорционально квадрату напряжения. По мере разгона двигателя пусковой ток уменьшается, а момент растет. При достижении двигателем рабочей скорости пусковое сопротивление закорачивается.

На фиг. 19 показаны механические характеристики двигателя типа МТК для различных способов пуска его при пониженном напряжении. Характеристика A соответствует автотрансформатор-



Фиг. 19.

ному пуску (фиг. 17), кривая $3C$ — пуску через активное сопротивление по фиг. 18, *а*, кривая $3P$ — пуску через реактор по фиг. 18, *б*. Характеристики рассчитаны для одного и того же пускового напряжения.

Расчет пусковых сопротивлений. Для асинхронных двигателей с фазовым ротором расчет пусковых сопротивлений производится аналогично тому, как это было указано для двигателей параллельного возбуждения постоянного тока, если максимальный пусковой момент M не превосходит $\sim 0{,}75\,M_к$.

Попрежнему обозначено

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \frac{I_{21}}{I_{22}}, \qquad (24)$$

где I_{21} — максимальный и I_{22} — минимальный пусковой ток ротора.

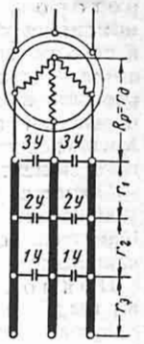
При заданных I_{21} и m находится

$$I_{22} = I_{21}\sqrt[m]{\frac{I_{21}s_н}{I_{2н}}}. \qquad (25)$$

При заданных I_{22} и m находится

$$I_{21} = I_{22}\sqrt[m+1]{\frac{I_{2н}}{I_{22}s_н}}. \qquad (26)$$

Величины пусковых сопротивлений находятся по формулам (11). Обозначения приведены на фиг. 20.



Фиг. 20.

Для двигателей с короткозамкнутым ротором расчет сопротивлений по фиг. 18 производится в следующем порядке.

1. Определяется

$$Z = \frac{U_н}{\sqrt{3}\,I_п}, \qquad (27)$$

где $I_п$ — естественный пусковой ток двигателя.

2. Определяется пусковой коэффициент мощности $\cos\varphi_п$:

$$\cos\varphi_п = \cos\varphi_н \times$$

$$\times\left[\mu_п\frac{\eta_н}{(1-s_н)\,k} + 0{,}35k\,(1-\eta_н)\right], \qquad (28)$$

где

$$\mu_п = \frac{M_{пуск}}{M_{ном}}; \quad k = \frac{I_п}{I_н}.$$

3. Если задан пусковой ток $I'_п = aI_п$, внешнее активное сопротивление $R_{вне}$ по схеме фиг. 18, *а* находится по формуле

$$R_{вне} = Z\left(\sqrt{\frac{1}{a^2} - \sin^2\varphi_п} - \cos\varphi_п\right). \qquad (29)$$

Внешнее реактивное сопротивление (схема фиг. 18, *б*) для этого случая

$$X_{вне} = Z\left(\sqrt{\frac{1}{a^2} - \cos^2\varphi_п} - \sin\varphi_п\right). \qquad (30)$$

4. Если задан пусковой момент $M'_п = bM_п$, внешнее активное сопротивление

$$R_{вне} = Z\left(\sqrt{\frac{1}{b} - \sin^2\varphi_п} - \cos\varphi_п\right). \qquad (31)$$

Внешнее реактивное сопротивление

$$X_{вне} = Z\left(\sqrt{\frac{1}{b} - \cos^2\varphi_п} - \sin\varphi_п\right). \qquad (32)$$

Регулирование скорости асинхронных электродвигателей. Для двигателей с фазовым ротором применяется регулирование скорости реостатом в цепи ротора. Схема регулирования не отличается от пусковой схемы, но реостат должен быть рассчитан на длительный режим. Этот способ дает возможность получить разные скорости (ниже синхронной) при наличии более или менее значительного момента статического сопротивления на валу двигателя. Механические характеристики приведены на фиг. 13, на которой показано, что при $M = M_1$ можно получить скорости n_1, n_2, n_3 и n_e.

Существенный недостаток этого метода — его неэкономичность, так как вся энергия скольжения теряется в реостате. Например, при работе двигателя со скольжением $s = 0{,}4$ (т. е. при $n = 0{,}6n_c$) примерно 40% мощности, забираемой от сети, будет теряться в реостате.

Вторым недостатком этого метода является резкая зависимость скорости от нагрузки при глубоком регулировании. По этим двум причинам реостатный способ применяется при регулировании скорости вниз не более 50% и главным образом для приводов повторно-кратковременного режима (например, в крановых двигателях переменного тока).

При длительном режиме работы двигателя на пониженной скорости вследствие ухудшения условий охлаждения нагрузка вентилируемых двигателей должна быть уменьшена следующим образом:

Скорость вращения в %	100	90	80	70	60	40	20
Вращающий момент в %	100	96	91	85	80	70	60
Мощность в %	100	86	73	60	48	28	12

Регулирование скорости изменением частоты f является плавным и экономичным, но требует отдельного источника энергии с регулируемой частотой и напряжением, а потому применяется лишь в специальных случаях. Напряжение должно изменяться примерно пропорционально частоте, для того чтобы двигатель работал с постоянным потоком.

Этот способ пригоден для двигателей как с фазовым, так и с короткозамкнутым ротором.

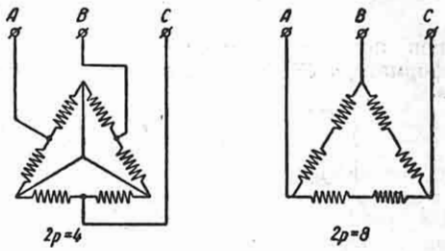
Для двигателей с короткозамкнутым ротором применяется ступенчатое регулирование скорости вращения изменением числа полюсов.

Из формулы

$$n_c = \frac{60f}{p},$$

где f — частота тока, следует, что если в данном двигателе изменить p — число пар полюсов обмотки, то изменится и синхронная скорость вращения n_c.

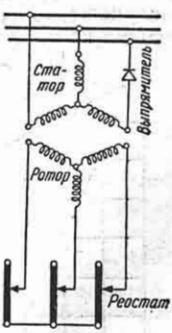
На фиг. 21 даны схемы для работы двигателя с постоянной мощностью при двух скоростях с отношением 1 : 2.



Фиг. 21.

Число полюсов двигателя можно изменять также, устраивая на статоре две или несколько обмоток на различное число полюсов.

В двигателе с короткозамкнутым ротором необходимо изменять число полюсов только на статоре, так как беличья клетка всегда образует столько же полюсов, сколько и обмотка статора. В двигателе с фазовым ротором необходимо одновременно изменять число полюсов в обмотках статора и ротора. Это значительно усложняет конструкцию двигателя. Поэтому многоскоростные асинхронные двигатели практически выполняются только с короткозамкнутым ротором.



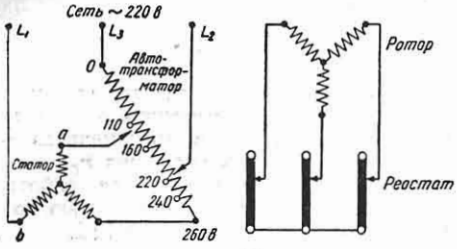
Фиг. 22.

Для получения низких устойчивых скоростей асинхронных электродвигателей могут применяться также специальные схемы.

На фиг. 22 приведена схема включения обмоток электродвигателя

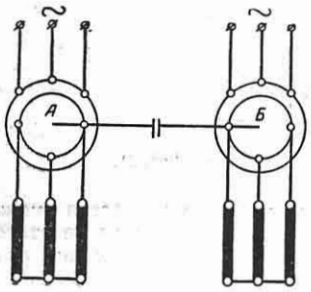
при возбуждении статора постоянным током без отключения его от сети.

На фиг. 23 приведена схема питания статора несимметричным напряжением



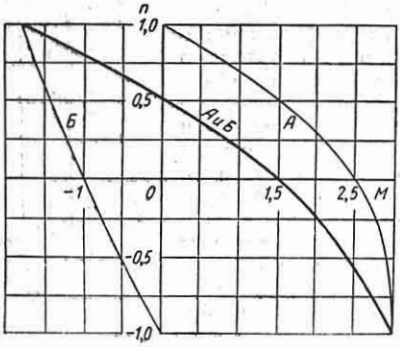
Фиг. 23.

при помощи специального автотрансформатора. Жесткие характеристики при



Фиг. 24.

низких рабочих скоростях могут быть получены при работе двух асинхронных машин на общую механическую систему,

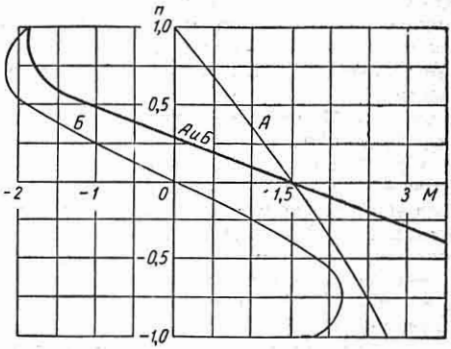


Фиг. 25.

причем одна из машин работает в двигательном, а другая — в тормозном режиме.

На фиг. 24 приведена схема, на фиг. 25 — механические характеристики двухдвигательного привода, причем машина *А* работает в двигательном режиме, а машина *Б* — в режиме торможения противовключением. Характеристика *А* и *Б* является результирующей этого привода.

На фиг. 26 приведены механические характеристики такого же двухдвига-



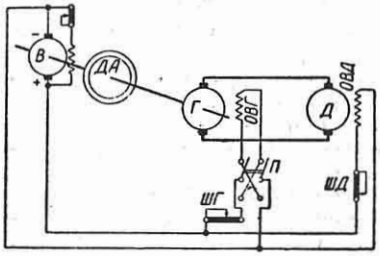
Фиг. 26.

тельного привода, причем *А* попрежнему работает в двигательном режиме, а *Б* — в режиме динамического торможения.

СТАТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОР — ДВИГАТЕЛЬ

Система генератор—двигатель (система Леонарда) — наиболее совершенная система управления и регулирования двигателей постоянного тока. Недостаток ее — необходимость в специальном двигатель-генераторе.

В этой системе (фиг. 27) двигатель постоянного тока *Д*, вращающий рабо-



Фиг. 27.

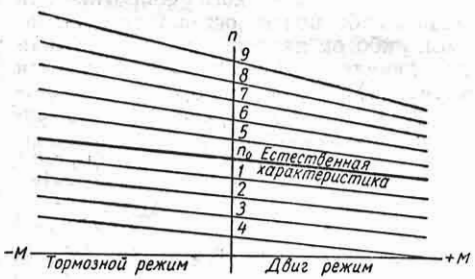
чий механизм, получает питание от отдельного генератора постоянного тока *Г*. Генератор приводится во вращение

синхронным или асинхронным двигателем. Как генератор, так и двигатель *Д* имеют независимое возбуждение (обычно от возбудителя *В*).

Регулирование скорости двигателя вниз от номинальной осуществляется изменением возбуждения генератора шунтовым реостатом *ШГ*. Вверх от номинальной скорость двигателя регулируется уменьшением собственного возбуждения при помощи шунтового реостата *ШД*. Пуск двигателя — безреостатный, осуществляется путем подъема напряжения генератора. Реверсирование двигателя достигается изменением полярности обмотки возбуждения генератора (переключатель *П*).

Диапазон регулирования скорости двигателя в этой системе достигает 1 : 20. При применении специальных схем с электромашинными усилителями диапазон регулирования может быть увеличен примерно до 1 : 1000.

Система генератор — двигатель дает возможность получить устойчивые скорости как в двигательном, так и в тормозном режиме. На фиг. 28 приведены механические характеристики системы *Г — Д*. Характеристики *1 — 4* и естественная соответствуют максимальному полю двигателя. Они параллельны между собой. Скорость в этом диапазоне регулируется изменением возбуждения генератора.

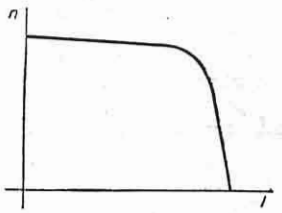


Фиг. 28.

Характеристики *5 — 9* соответствуют полному напряжению генератора и ослабленному магнитному потоку двигателя. Характеристики идут тем круче, чем меньше ток возбуждения двигателя.

Система *Г — Д* находит широкое применение для приводов с большим диапазоном регулирования, частыми пусками и реверсами (прокатные двигатели, привод тяжелых станков, шахтные подъемники, бумажные машины и т. д.).

Применяя специальные питающие генераторы с тремя обмотками (независимая, самовозбуждения и противокомпаундная), можно получить характеристику с резким уменьшением скорости при значительных перегрузках. Такие характеристики (фиг. 29) нужны в приводе экскаваторов, некоторых механизмов металлургических цехов, в подъемных и судовых механизмах и т. д.



Фиг. 29.

Подобные же характеристики могут быть получены и с обычными генераторами, но возбуждаемыми от электромашинных или магнитных усилителей по специальным схемам.

В качестве источников постоянного тока с регулируемым напряжением могут применяться также ртутные выпрямители или тиратроны.

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Уравнение движения

Режимы работы, при которых происходит изменение скорости двигателя, называются *неустановившимися* или *переходными* в отличие от установившегося режима, при котором электродвигатель вращается с постоянной скоростью.

Связь между вращающими моментами, действующими на электропривод, устанавливается уравнением

$$M + M_c = M_д, \qquad (33)$$

где M — момент, развиваемый электродвигателем; M_c — приведенный момент статического сопротивления; $M_д$ — приведенный динамический момент.

Все моменты выражены в *кГм*.

Динамический момент

$$M_д = J\frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375}\cdot\frac{dn}{dt}. \qquad (34)$$

Здесь J — приведенный момент инерции всей системы (электропривода) в *кГмсек²*; $GD^2 = 4gJ$ — приведенный маховой мо-

мент в $кГм^2$, где D — диаметр инерции в $м$, G — вес в $кГ$; $\frac{dn}{dt}$ — угловое ускорение вала электродвигателя, выраженное в об/мин·сек.

В уравнении (33) моменты M, M_c и $M_д$ могут быть положительными или отрицательными. Моментам M и M_c приписываются положительные знаки, если направление их действия совпадает с направлением вращения электропривода. Если направление действия этих моментов противоположно направлению вращения, им приписывается знак минус.

Если происходит ускорение электропривода, $\frac{dn}{dt}$, а следовательно и $M_д$, в уравнении (33) имеют положительный знак. При замедлении электропривода $\frac{dn}{dt}$ и $M_д$ отрицательны. При установившейся скорости $\frac{dn}{dt} = 0$, а следовательно, и $M_д = 0$.

Пример 1. Уравнение движения для пуска грузоподъемного механизма при подъеме груза

$$M - M_c = M_д.$$

Пример 2. Электрическое торможение опускаемого груза:

$$-M + M_c = -M_д.$$

Приведение статических моментов к валу двигателя

Если энергия передается от двигателя к механизму (например, для подъема, передвижения груза или для преодоления момента от трения или резания), то приведенный к валу двигателя статический момент равен

$$M_{c\uparrow} = \frac{M_s}{i\eta}, \qquad (35)$$

а если энергия передается от механизма к двигателю (например, при спуске груза), то статический момент

$$M_{c\downarrow} = \frac{M_s}{i}\eta = M_{c\uparrow}\eta^2, \qquad (36)$$

где M_s — статический момент на рабочем органе машины в $кГм$; M_c — приведенный статический момент на валу двигателя в $кГм$; $i = i_1 i_2 i_3 \ldots i_n$ — общее передаточное число передач между двигателем и механизмом; $\eta = \eta_1\eta_2\eta_3 \ldots \eta_n$ — полный к. п. д. передач.

В расчетах, требующих повышенной точности, учитывают изменение к. п. д. с загрузкой механизма. Для обычных расчетов принимают номинальную величину к. п. д.

Момент статического сопротивления машин либо может оставаться постоянным, либо он изменяется в зависимости от скорости, положения механизма или времени. В табл. 1 приведена соответствующая классификация исполнительных механизмов.

Таблица 1

Классификация исполнительных механизмов по характеру типичного изменения момента статической нагрузки

$M_s = \text{const}$	$M_s = f(v)$	$M_s = f(s)$	$M_s = \psi(v, s)$	$M_s = f(t)$
Мостовые краны Подъемные лебедки Шахтные подъемники с уравновешенным канатом Многие металлорежущие станки (строгальные, токарные и др.) Прокатные станы Ленточные конвейеры Рольганги Ротационные машины Нажимные устройства прокатных станов	Вентиляторы Центробежные насосы Рогулечные и кольцевые ватеры Листовальные и обкладочные каландры	Механизмы с кривошипной передачей Подъемные качающиеся столы Поршневые компрессоры Шахтные подъемники с неуравновешенным канатом Вагоноопрокидыватели Деррик-краны Различные ножницы Ткацкие станки Качающиеся мартеновские печи Плоскопечатные машины	Электровозы Рулевые устройства Регуляторы скольжения	Дефибреры Мездрильные машины Механизмы вращательного бурения Кардочесальные машины Бумажные роллы Фрикционные молоты Шлифовальные станки

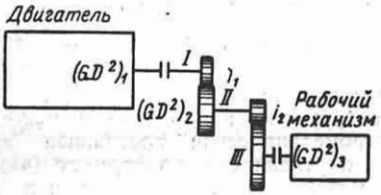
Обозначения: M_s — момент статического сопротивления на рабочем органе машины (момент нагрузки при установившемся движении); v — скорость передвижения рабочего органа машины; s — путь, проходимый рабочим органом машины; t — время работы.

Определение приведенных маховых моментов

Приведенный к валу двигателя *I* (фиг. 30) маховой момент всех вращающихся частей системы

$$GD^2 = (GD^2)_1 + \frac{(GD^2)_2}{i_1^2} + \frac{(GD^2)_3}{i_1^2 i_3^2}, \quad (37)$$

где $(GD^2)_2$, $(GD^2)_3$ — маховые моменты всех вращающихся частей, расположенных соответственно на валах *II* и *III*; i_1, i_2 — передаточные числа.



Фиг. 30.

Если вал *I* вращается со скоростью $n_1 = 1000$ об/мин., а вал *III* — со скоростью $n_3 = 100$ об/мин, общее передаточное число $i = i_1 i_2 = 10$, и приведенный маховой момент вращающихся частей вала *III*

$$(GD^2)_{31} = \frac{(GD^2)_3}{10^2} = 0{,}01\,(GD^2)_3.$$

Если механизм содержит поступательно движущиеся части, эквивалентный им приведенный маховой момент определяется формулой

$$(GD^2)_{пост} = 364G\frac{v^2}{n^2}, \quad (38)$$

где G — вес поступательно движущихся частей в *кГ*; v — линейная скорость в *м/сек*; n — соответствующая скорости v угловая скорость вращения в об/мин вала, к которому приводится поступательное движение.

Если приведенный маховой момент рабочего механизма значителен по сравнению с маховым моментом частей на валу двигателя, при расчете переходных процессов необходимо учитывать дополнительные потери в редукторе при передаче через него динамического момента рабочего механизма:

$$(GD^2)_{м1} = \frac{(GD^2)_м}{i^2\eta_р}. \quad (39)$$

Здесь $(GD^2)_{м1}$ — приведенный к валу двигателя маховой момент механизма; $(GD^2)_м$ — маховой момент механизма относительно собственного вала; $\eta_р$ — к. п. д. редуктора.

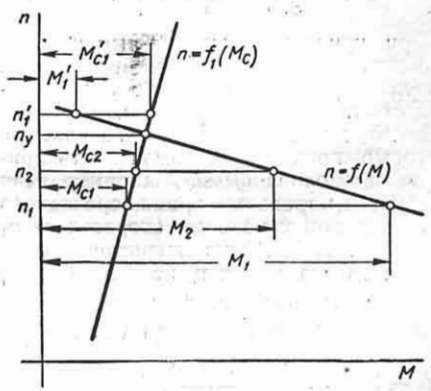
Введение к. п. д. в формулу приведения является чисто расчетным приемом. Оно целесообразно, если

$$(GD^2)_{м1} > 0{,}5(GD^2)_1.$$

Формулы (37) — (39) предполагают постоянство передаточных чисел. Если механизм имеет звенья с переменными передаточными числами (например, кривошипно-шатунные), это должно быть учтено в формулах приведения. Для вычисления моментов инерции и маховых моментов физических тел разной формы можно воспользоваться табл. 8 в т. 1 на стр. 394 глава „Теоретическая механика".

Время переходного процесса

При линейной зависимости момента двигателя M и момента статического сопротивления M_c от скорости (фиг. 31)



Фиг. 31.

время переходного процесса при изменении скорости от n_1 до n_2 определяется формулой

$$t = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{д1} - M_{д2}} \ln\frac{M_{д1}}{M_{д2}} \text{ сек.} \quad (40)$$

Здесь GD^2 — приведенный к валу двигателя маховой момент всей системы в *кГм*²; $M_{д1} = M_1 - M_{c1}$ — динамический момент в *кГм* при начальной скорости n_1; $M_{д2} = M_2 - M_{c2}$ — то же при конечной скорости n_2.

Знаки моментов указаны применительно к процессу ускорения (фиг. 31).

Формула (40) пригодна для любого режима изменения скорости привода — ускорения и замедления. Например, если начальная скорость привода была n_1', он будет замедляться, причем момент

$$M_{\partial 1}' = M_1' - M_{c1}'$$

отрицателен. Установившаяся скорость n_y теоретически достигается через время, равное ∞. Практически скорость n_y достигается через время, равное $(3 \div 4)\theta$, где θ — электромеханическая постоянная привода, равная

$$\theta = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{\partial 1} - M_{\partial 2}} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_y - n_1}{M_{\partial 1}} \text{ сек.} \quad (41)$$

Если динамический момент при переходном процессе остается постоянным и равным M_∂, для определения t нужно пользоваться формулой

$$t = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_\partial} \text{ сек.} \quad (42)$$

При криволинейных характеристиках момента двигателя и момента M_c для определения времени можно также воспользоваться формулой (40), если требуемый диапазон разбить на участки, которые практически могут быть приняты прямолинейными. Например, если требуется определить время переходного процесса при изменении скорости от n_1 до n_2 (фиг. 32), этот диапазон разбивается на два участка: первый — от n_1 до n_1' и второй — от n_1' до n_2.

Время разгона на первом участке

$$t_1 = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_1' - n_1}{M_{\partial 1} - M_{\partial 1}'} \ln \frac{M_{\partial 1}}{M_{\partial 1}'} \text{ сек.}, \quad (43)$$

время разгона на втором участке

$$t_2 = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1'}{M_{\partial 1}' - M_{\partial 2}} \ln \frac{M_{\partial 1}'}{M_{\partial 2}} \text{ сек.} \quad (44)$$

Полное время разгона

$$t = t_1 + t_2.$$

Электромеханические переходные процессы

Задачами расчета переходных процессов является нахождение зависимостей

$$n = f_1(t);$$

$$M = f_2(t); \quad i = f_3(t).$$

При линейной зависимости $n = f(M)$ и $n = f_1(M_c)$ (см. фиг. 31) справедливы следующие уравнения:

$$n = n_y \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) + n_1 e^{-\frac{t}{\theta}}; \quad (45)$$

$$M = M_y \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) + M_1 e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (46)$$

и если ток двигателя пропорционален моменту

$$i = I_y \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) + I_1 e^{-\frac{t}{\theta}}. \quad (47)$$

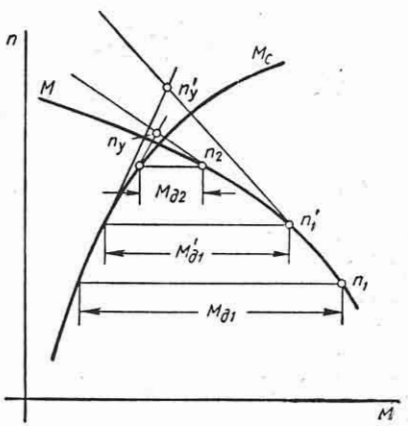
В этих уравнениях n_y — установившаяся скорость электродвигателя, при которой $M = M_c$; M_y и I_y — момент и ток при скорости n_y; θ — электромеханическая постоянная времени, определяемая по формуле (41).

Для двигателей асинхронных и двигателей постоянного тока параллельного возбуждения при $M_c = \text{const}$ для определения θ может быть использовано также выражение

$$\theta = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 s_н}{M_н}, \quad (48)$$

где n_0 — синхронная скорость, или скорость идеального холостого хода; $s_н$ — скольжение при номинальном моменте на данной характеристике.

В уравнениях (45) — (47) n_1, M_1, I_1 — соответственно начальные скорость, момент, ток.



Фиг. 32.

Если ток не пропорционален моменту, уравнением (47) пользоваться нельзя. Для нахождения зависимости $i = f_3(t)$

в этом случае нужна кривая $M = \psi(i)$. Найдя по уравнению (46) $M = f_2(t)$, для каждого значения M находят ток i и строят график зависимости $i = f_3(t)$.

При криволинейных характеристиках (фиг. 32) для построения кривых переходных процессов характеристики разбиваются на участки, которые практически могут быть приняты прямолинейными. Для первого участка от n_1 до n_1'

$$n = n_y'\left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_1}}\right) + n_1 e^{-\frac{t}{\theta_1}};$$

$$M = M_y'\left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_1}}\right) + M_1 e^{-\frac{t}{\theta_1}},$$

где M_y' и M_1 — моменты двигателя при скоростях соответственно n_1' и n_1;

$$\theta_1 = \frac{GD^2}{375}\cdot\frac{n_y' - n_1}{M_{\partial 1}} = \frac{GD^2}{375}\cdot\frac{n_1' - n_1}{M_{\partial 1} - M_{\partial 1}'}.$$

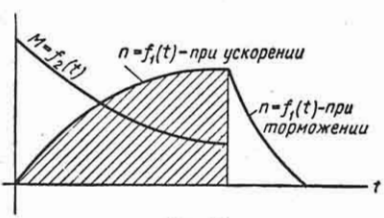
Аналогично для второго участка

$$n = n_y\left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_2}}\right) + n_1' e^{-\frac{t}{\theta_2}};$$

$$M = M_y\left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_2}}\right) + M_1' e^{-\frac{t}{\theta_2}};$$

$$\theta_2 = \frac{GD^2}{375}\cdot\frac{n_y - n_1'}{M_{\partial 1}'} = \frac{GD^2}{375}\cdot\frac{n_2 - n_1'}{M_{\partial 1}' - M_{\partial 2}}.$$

На фиг. 33 приведены примерные кривые изменения скорости при ускорении



Фиг. 33.

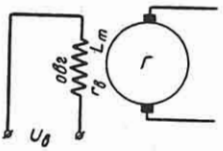
и при торможении и кривая изменения момента двигателя при ускорении, рассчитанные по уравнениям (45) и (46).

Заштрихованная часть площади представляет собой число оборотов (путь), которое проделал двигатель за время ускорения.

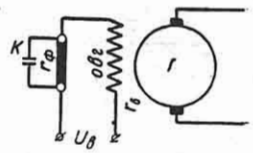
Переходные режимы в системе генератор-двигатель

В системе генератор-двигатель (см. фиг. 27) пуск двигателя благодаря наличию индуктивности обмотки возбуждения генератора может производиться путем включения обмотки *овг* сразу на полное или даже повышенное напряжение.

При включении цепи возбуждения генератора на напряжение $U_в$ (фиг. 34)



Фиг. 34.



Фиг. 35.

ток в обмотке *овг* будет постепенно нарастать по уравнению

$$i_в = I_{в.\,y}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right). \qquad (49)$$

Здесь $I_{в.\,y} = \frac{U_в}{r_в}$ — установившийся ток возбуждения; $T_m = \frac{L_m}{r_в}$ сек. — конструктивная электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения, где L_m — индуктивность *овг* в *гн*; $r_в$ — сопротивление *овг*.

Следовательно, магнитный поток генератора и его напряжение также будут возрастать постепенно.

Для ускорения процесса возбуждения применяется форсировка, схема которой показана на фиг. 35. При включении контакт K замкнут, и к обмотке прикладывается повышенное напряжение. Когда ток в обмотке возбуждения достигнет номинального значения, контакт K раскрывается.

Коэффициент форсировки

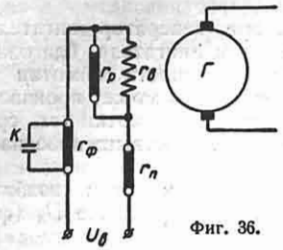
$$\alpha = \frac{I_{в\,\max}}{I_{в.\,y}}, \qquad (50)$$

где $I_{в\,\max} = \frac{U_в}{r_в}$; $I_{в.\,y} = \frac{U_в}{r_в + r_ф}$,

или

$$\alpha = \frac{r_в + r_ф}{r_в}. \qquad (51)$$

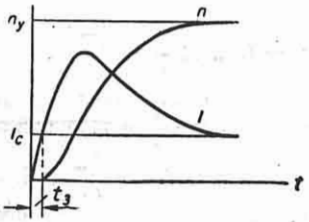
Обычно параллельно обмотке возбуждения включается разрядное сопротивление, а последовательно с обмоткой может включаться последовательное сопротивление $r_п$ (фиг. 36).



Фиг. 36.

Пуск двигателя

Возбуждение генератора и появление напряжения на его зажимах повлечет протекание тока в главной цепи (см. фиг. 27), и двигатель начнет разворачиваться. Характер изменения скорости двигателя и тока главной цепи при пуске показан на фиг. 37. Здесь следует отметить, что при пуске с нагрузкой двигатель начинает разворачиваться через время $t_з$ после подключения обмотки возбуждения к напряжению.



Фиг. 37.

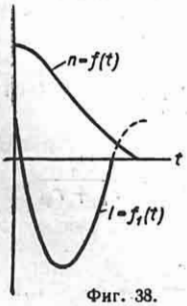
Торможение

Если обмотку возбуждения работающего генератора отключить от сети и замкнуть на разрядное сопротивление, э. д. с. генератора начнет уменьшаться по закону

$$e_г = E_1 e^{-\frac{t}{T_T}}, \quad (52)$$

где T_T — электромагнитная постоянная времени цепи обмотки возбуждения генератора при торможении.

$$T_T = \frac{L_m}{r_в + r_р}. \quad (53)$$



Фиг. 38.

Скорость двигателя будет постепенно уменьшаться.

На фиг. 38 приведены примерные кривые изменения скорости и тока главной цепи при торможении с нагрузкой.

Реверс двигателя

При переключении обмотки возбуждения генератора ток в ней сначала быстро уменьшится, а затем изменит направление на обратное. Это приведет к торможению двигателя, а затем и к изменению направления его вращения и ускорению в обратном направлении.

Фиг. 39.

На фиг. 39 приведены примерные кривые изменения скорости и тока главной цепи при реверсе двигателя с коэффициентом форсировки $\alpha = 1$ и при отсутствии нагрузки на его валу.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Расчет мощности электродвигателя по условиям нагрева

В процессе работы электродвигателя имеют место потери энергии в нем, что является причиной нагрева двигателя. Длительно допустимые превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды зависят от рода изоляции: класс А (хлопок, шелк, бумага и другие органические материалы, погруженные или пропитанные маслом, эмаль, применяемая для покрытия проволоки); класс В (изделия из слюды и асбеста, содержащие органические связующие вещества), теплостойкая изоляция, применяемая в специальных типах электродвигателей (изделия из слюды, асбеста, стеклянной пряжи на теплостойких лаках, слюда и стеклянная пряжа без лаков, а также фарфор, кварц и другие керамические материалы).

Температура окружающего воздуха принимается равной 35° С.

Длительно допустимое превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки, рекомендуемое нормами: а) для изоляции класса А 70° С; б) для изоляции класса В 90° С.

Работа при температуре более высокой, нежели это указано, сокращает нормальный срок службы изоляции; работа при более низкой температуре удлиняет его.

Ориентировочно можно считать, что срок службы изоляции уменьшается в 2 раза при увеличении рабочей температуры на 8—10° С.

Нагрев электродвигателя и режимы работы. Нагрев электродвигателя зависит от режима его работы и величины нагрузки. При продолжительной неизменной нагрузке температура электродвигателя через некоторое время t_y час. достигает установившегося значения. После снятия нагрузки температура двигателя через t'_y час. достигнет температуры окружающего воздуха.

Времена t_y и t'_y зависят от постоянных времени нагрева $T_н$ или охлаждения T_o. Постоянная времени нагрева или охлаждения определяется как отношение $T = \frac{c}{A}$, где c — теплоемкость электродвигателя, A — его теплоотдача, т. е. количество тепла, отдаваемое в окружающую среду в 1 сек. при разности температур 1° С. Величины $T_н$ и T_o для различных двигателей различны (от нескольких минут до нескольких часов — бо́льшие значения для закрытых и более мощных двигателей). У закрытых двигателей без вентиляции $T_н \approx T_o$, у открытых двигателей $T_o > T_н$. Время $t_y \approx (4 \div 5) T_н$ и $t'_y \approx (4 \div 5) T_o$.

Кривые нагрева и охлаждения приближенно могут быть выражены следующими уравнениями:

уравнение нагрева

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_н}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T_н}}, \quad (54)$$

уравнение охлаждения

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T_o}}. \quad (55)$$

Здесь τ_y — установившееся превышение температуры обмоток двигателя над температурой окружающей среды

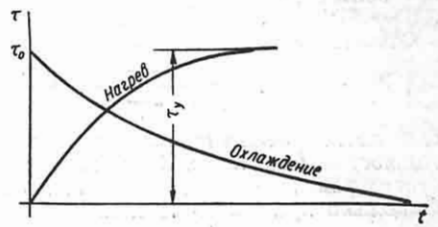
$$\tau_y = -\frac{I^2 R}{A}, \quad (56)$$

т. е. установившееся превышение температуры пропорционально квадрату тока двигателя. τ_0 — начальное превышение температуры.

На фиг. 40 приведены примерные кривые нагрева и охлаждения двигателя, построенные по уравнениям (54) и (55), причем $T_н < T_o$.

Для кривой охлаждения τ_0 принято равным τ_y.

Рабочие электрифицированные машины могут работать продолжительно (компрессоры, конвейеры, насосы, эскалаторы и др.), в течение коротких промежутков времени (специальные лебедки, механизмы разводных мостов, установочные механизмы и др.) и в течение коротких промежутков времени, чередующихся с короткими остановками (краны, подъемники, вспомогательные механизмы металлургических цехов). Двигатели для всех трех случаев выбираются исходя из стандартных режимов, указанных ниже.



Фиг. 40.

Продолжительный режим работы — режим при неизменной температуре окружающего воздуха и нагрузке, длящейся столько времени, что превышения температур отдельных частей машины достигают практически установившихся значений.

Кратковременный режим работы — режим, при котором периоды неизменной нагрузки при неизменной температуре окружающего воздуха чередуются с периодами отключения; при этом длительность периодов нагрузки такова, что превышения температур отдельных частей машин не достигают практически установившихся значений, периоды же остановки настолько длительны, что температура всех частей машины практически достигает температуры окружающей среды.

Стандартные номинальные длительности кратковременной работы электромашин: 15, 30 и 60 мин.

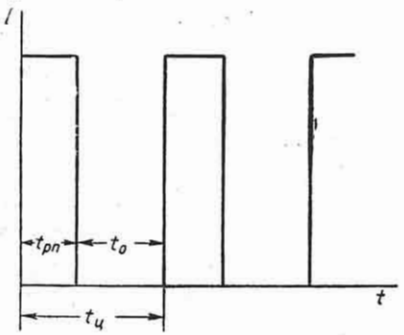
Повторно-кратковременный режим работы — режим, при котором кратковременные периоды неизменной нагрузки при неизменной температуре окружающего воздуха чередуются с кратковременными периодами отключения машины (паузами); при этом длительность рабочих периодов и пауз такова, что температуры отдельных частей машин не достигают установившихся значений. Такой режим характеризуется отношением продолжительности рабочего периода $t_{p.n}$ к продолжительности всего цикла ($t_ц = t_{p.n} + t_o$).

Примерный график работы двигателя при повторно-кратковременном режиме (ПВ = 40%) приведен на фиг. 41.

Отношение

$$ПВ\% = \frac{t_{p.n}}{t_ц} 100 = \frac{t_{p.n}}{t_{p.n} + t_o} 100 \quad (57)$$

называется относительной продолжительностью включения. При повторно-кратковременном режиме время цикла не должно превышать 10 мин.



Фиг. 41.

Нормальной относительной продолжительностью включения принято считать ПВ = 25%. Применяется также ПВ = 15, 40, 60%; при продолжительном режиме работы ПВ = 100%.

Если двигатель работает при продолжительном режиме с постоянной нагрузкой, то расчет мощности его по нагреву сводится к проверке одного из соотношений $P_н \geqslant P$, $I_н \geqslant I$ и $M_н \geqslant M$ (последнее выражение не относится к двигателям параллельного возбуждения с регулировкой скорости в шунте).

Здесь $P_н$, $I_н$ и $M_н$ — номинальные мощность, ток и момент двигателя, выбираемого по каталогу; P, I и M — фактические мощность, ток и момент двигателя.

Если двигатель работает при продолжительной переменной нагрузке, расчетом определяются ток $I_э$, мощность $P_э$ или момент $M_э$, эквивалентные по нагреву продолжительному неизменному току, мощности или моменту.

Расчет мощности двигателя в этих случаях также сводится к проверке одного из соотношений $P_н \geqslant P_э$; $I_н \geqslant I_э$; $M_н \geqslant M_э$.

Определение эквивалентных мощности, тока, момента производится по графикам нагрузки, построенным для полного времени цикла (нагрузочным диаграммам). Примерный вид такого графика приведен на фиг. 42, стр. 429.

Основным методом расчета двигателя по нагреву является метод эквивалентного тока. Если при всех условиях работы данного графика мощность или момент пропорциональны току, могут быть использованы также методы эквивалентной мощности или момента. Метод эквивалентного момента не пригоден для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при частых пусках, для двигателей постоянного тока параллельного возбуждения с регулированием скорости путем ослабления магнитного потока, а также для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

Метод эквивалентной мощности не пригоден при частых пусках для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и для системы генератор — двигатель. В остальных случаях использования этого метода следует принимать максимальное значение пусковой мощности при учете пусковых периодов.

Эквивалентный ток

При продолжительном режиме с переменной нагрузкой, если график может быть разбит на ряд участков с неизменным по величине током на каждом участке (при отсутствии пауз) (фиг. 42), эквивалентный ток определяется по формуле

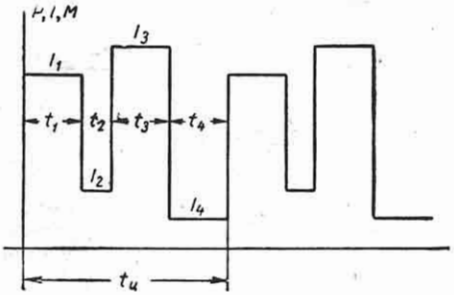
$$I_э = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_x^2 t_x}{t_1 + t_2 + \ldots + t_x}} = \sqrt{\frac{\sum I^2 t}{t_ц}}. \quad (58)$$

Если при этом график содержит пуски, торможения и паузы (в течение вре-

мени t_0), то эквивалентный ток подсчитывается по формуле

$$I_э = \sqrt{\frac{I_п^2 t_п + I_т^2 t_т + I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_x^2 t_x}{\beta(t_п + t_т) + \beta_0 t_0 + t_1 + t_2 + \ldots + t_x}}, \quad (59)$$

где $I_п$ — пусковой ток в a; $I_т$ — тормозной ток в a; $t_п$ — время пуска в сек.; $t_т$ — время торможения в сек.; t_0 — время паузы, в сек.; β и β_0 — коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения двигателя при неполной скорости или при остановке его (вводятся для двигателей с самовентиляцией).



Фиг. 42.

Для двигателей с охлаждением внутренних пространств от собственного вентилятора $\beta_0 = 0{,}25 \div 0{,}35$; $\beta \approx 0{,}65$. Для закрытых двигателей с наружным обдувом (например, серии АО) $\beta_0 = 0{,}45 \div 0{,}55$; $\beta \approx 0{,}75$.

Коэффициенты ухудшения охлаждения вводятся также и при расчетах по методам эквивалентных момента и мощности.

Отдельные участки графика могут иметь трапециевидную форму (фиг. 43). Эквивалентный ток таких участков подсчитывается по формуле

$$I_э = \sqrt{\frac{I_x^2 + I_y^2 + I_x I_y}{3}}. \quad (60)$$

При выборе двигателей для повторно-кратковременного режима работы эквивалентный ток подсчитывают для периодически повторяющихся циклов работы без учета времени пауз:

$$I_э = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_x^2 t_x}{t_1 + t_2 + \ldots + t_x}} = \sqrt{\frac{\sum I_{p.n}^2 t_{p.n}}{\sum t_{p.n}}}, \quad (61)$$

где $I_{p.n}$ — рабочий ток в a; $t_{p.n}$ — время работы в сек.

Если фактическая относительная продолжительность включения

$$ПВ_ф = \frac{\sum t_{p.n}}{\sum t_{p.n} + t_0} 100\%$$

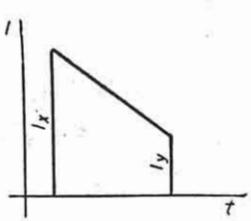
равна или близка к номинальной $ПВ_н$, эквивалентный ток выбранного двигателя должен удовлетворять условию $I_э \leqslant I_н$.

Если фактическая продолжительность включения $ПВ_ф$ отличается от номинальной, то фактический эквивалентный ток $I_ф$ должен быть пересчитан на номинальную $ПВ_н$ по формуле

$$I_{э.н} = I_ф \sqrt{\frac{ПВ_ф}{ПВ_н}}. \quad (62)$$

Здесь $I_{э.н}$ — ток данного графика, пересчитанный на $ПВ_н$. Этот ток должен быть меньше или равен номинальному току двигателя при данной номинальной $ПВ_н$. Принимая за номинальный режим при $ПВ = 25\%$, определяют ток при $ПВ = 15\%$ $I_{15} = 1{,}3 I_{25}$ и при $ПВ = 40\%$ $I_{40} = 0{,}8 I_{25}$.

Выбор двигателя по нагреву для повторно-кратковременного режима по указанной здесь методике производится в случае применения двигателей крановых или металлургических, мощность которых маркирована по повторно-кратковременному режиму. Если же при повторно-кратковременном режиме выбирается двигатель общепромышленного типа (например, серии А), мощность которого маркирована по продолжительному режиму, определение эквивалентного тока графика производится по формуле (59) с учетом времени пауз.



Фиг. 43.

При кратковременном режиме следует выбирать двигатель, мощность которого маркирована именно по этому режиму на 15, 30 или 60 мин.

Для периода нагрузки подсчитывается эквивалентный ток

$$I_{эк} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots}{t_к}}, \quad (63)$$

где $t_к$ — ближайшее к фактической длительности номинальное время работы двигателя 15, 30 или 60 мин. Подсчитанный таким образом $I_{эк}$ должен быть меньше или равен номинальному току двигателя при данном $t_к$.

Эквивалентный момент и эквивалентная мощность

Использование этих методов ограничивается случаями, когда момент двигателя и его мощность пропорциональны току. Структура формул эквивалентного момента и мощности совершенно идентична структуре формул эквивалентного тока. Например, для графика по фиг. 42

$$M_э = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4}{t_ц}};$$

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4}{t_ц}}.$$

Определение допустимой частоты включений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Число включений в час асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором часто ограничивает их применение.

Для этих двигателей при частых пусках очень существенную роль играют потери энергии при пуске и торможении, ограничивающие с точки зрения нагрева двигателя допустимую частоту его включений. В этих случаях следует определить допустимое число включений двигателя в час h, при котором фактическое среднее превышение температуры двигателя будет равно максимально допустимому:

$$h = 3700 \times$$

$$\times \frac{\Delta P_н \beta_0 (1 - ПВ_ф) + \Delta P_н ПВ_ф \left(1 - \frac{\Delta P_x}{\Delta P_н}\right)}{\Delta A_п + \Delta A_T}.$$

Здесь $\Delta P_н$ — полные потери мощности в двигателе при номинальной его нагрузке:

$$\Delta P_н = P_н \frac{1 - \eta_н}{\eta_н} \text{ квт};$$

ΔP_x — потери мощности в двигателе при фактической нагрузке; $\Delta A_п$ — потеря энергии за период пуска — может быть определена ориентировочно по формуле

$$\Delta A_п = \frac{GD^2 n_c^2}{365\,000} + \frac{M_c n_c t_п}{1000} + \frac{\Delta P_н}{2} t_п \text{ квт·сек},$$

где n_c — скорость вращения в об/мин при моменте статического сопротивления M_c; $t_п$ — продолжительность пуска в сек.; ΔA_T — потери энергии за период торможения — могут быть ориентировочно определены по формуле

$$\Delta A_T = a \frac{GD^2 n_c}{365\,000} - \frac{M_c n_c t_T}{1000} + \frac{\Delta P_н}{2} t_T \text{ квт·сек},$$

где $a = 1$ для динамического торможения, $a = 3$ для торможения противовключением; t_T — продолжительность торможения от $n = n_c$ до $n = 0$; $ПВ_ф$ — фактическая относительная продолжительность включения.

Указания по выбору двигателя

При окончательном выборе двигателя, проверенного по нагреву, нужно учитывать еще ряд условий и требований, которым должен удовлетворять двигатель.

К числу этих условий относятся следующие.

1. Правильный выбор номинальной скорости вращения электродвигателя. Нужно иметь в виду, что при данной мощности габаритные размеры, вес и стоимость двигателя тем больше, чем меньше его номинальная скорость вращения.

2. Пусковой момент. Это требование в особенности важно учитывать при применении двигателей с короткозамкнутым ротором, которые имеют вполне определенный пусковой момент. При оценке требуемого пускового момента двигателя не следует забывать, что у ряда механизмов, в особенности таких, где трение составляет значительную часть нагрузки, пусковой момент может превышать на 30—50% расчетный статический момент сопротивления при движении.

3. Вид механической характеристики, которая определяет степень зависимости скорости от нагрузки (момента) на валу двигателя. Двигатели параллельного возбуждения постоянного тока и асинхронные электродвигатели переменного тока обладают жесткими естественными характеристиками. Их скорость мало зависит от нагрузки. Такая характеристика целесообразна для очень многих производственных механизмов: насосов, вентиляторов, большинства станков, конвейеров, механизмов передвижения кранов и т. д.

Двигатели последовательного возбуждения постоянного тока обладают мягкой характеристикой. Их скорость резко увеличивается при уменьшении нагрузки, а при холостом ходе эти двигатели могут пойти вразнос. Подобная характеристика благоприятна для грузоподъемных крановых установок и для тяги.

Двигатели смешанного возбуждения постоянного тока имеют промежуточные характеристики.

Эти двигатели могут работать при отсутствии нагрузки на валу без опасности разноса.

4. Необходимо учитывать перегрузочную способность двигателя, в особенности при повторно-кратковременном и кратковременном режимах работы и при пиковом характере нагрузки. Для асинхронных электродвигателей перегрузочная способность, т. е. $\frac{M_{max}}{M_{ном}}$, указывается в каталогах и приведена в справочных данных двигателей. Перегрузочная способность двигателей постоянного тока указана в разделе „Механические характеристики".

5. Необходимость электрического регулирования скорости электропривода является одним из важнейших факторов, определяющих выбор электрического типа двигателя и системы электропривода. Регулировочные свойства различных электродвигателей и системы генератор — двигатель указаны в разделе „Механические характеристики".

6. Электродвигатели могут иметь различное конструктивное выполнение: нормальное для горизонтальной установки на лапах, вертикальное, фланцевое, встроенное, с двумя концами вала и др. Это необходимо учитывать при конструировании электроприводов.

7. Очень существенным для надежной эксплуатации электропривода является правильный выбор электродвигателя с точки зрения его защиты от действия окружающей среды. Электродвигатели могут иметь различные формы и степени защиты в соответствии с классификацией, приведенной в главе „Электрические машины" (стр. 378).

В табл. 2 даны указания по выбору исполнения двигателя для различных производственных помещений.

Таблица 2

Выбор двигателя по исполнению для различных производственных помещений

Наименование производственного помещения	Двигатели	
	рекомендуются	допускаются
Механические сборочные и кузнечные цехи. Машинные залы	Открытые и защищенные с нормальной изоляцией	
Литейные, землезаготовительные, деревообделочные, модельные, ремонтно-строительные цехи, если не применяются взрывоопасные растворители	Закрытые с нормальной изоляцией	Закрытые вентилируемые с противосыростной изоляцией
Травильные цехи	Герметические и закрытые с нормальной изоляцией	Защищенные с противосыростной изоляцией
Ацетиленовые и бензохранилища, зарядные станции. Малярные цехи, если применяются взрывоопасные растворители красок. Различные химические производства. Машинные залы газогенераторных станций	Газовзрывобезопасные с нормальной изоляцией	

Продолжение табл. 2

Наименование производственного помещения	Двигатели	
	рекомендуются	допускаются
Углепомольные	Герметические и закрытые с нормальной изоляцией	
Котельные с ручными топками и склады угля	Закрытые с нормальной изоляцией	Закрытые вентилируемые с противосыростной изоляцией
Неотапливаемые крытые склады	Открытые и защищенные с противосыростной изоляцией	
Установки на открытом воздухе	Закрытые с противосыростной изоляцией	Защищенные с противосыростной изоляцией

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Вешеневский С. Н., Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей, Энергоиздат, 1954.
2. Голован А. Т., Электропривод, Энергоиздат, 1948.
3. Морозов Д. П., Основы электропривода, Энергоиздат, 1950.
4. Морозов Д. П., Теория электропривода и автоматика реверсивных станов, Энергоиздат, 1949.
5. Ринкевич С. А., Теория электропривода, ГОНТИ, 1938.
6. Попов В. К., Основы электропривода Энергоиздат, 1951.
7. Фатеев А. В. и Норневский Б. И., Сборник примеров и задач по теории электрического привода, Энергоиздат, 1951.
8. Харизоменов И. В., Электрическое оборудование металлорежущих станков. Машгиз, 1952.
9. Чиликин М. Г., Общий курс электропривода, Энергоиздат, 1953.

ГЛАВА XV

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АППАРАТУРЕ

Рубильники и рубящие переключатели строятся на токи от 60 до 1000 *а* для работы в сетях напряжением до 500 *в*. Могут иметь центральную рукоятку, боковой или рычажный привод. Число полюсов 1, 2 или 3. Рубильники до 200 *а* могут поставляться в кожухе и с пристроенными блок-контактами.

Пакетные и другие малогабаритные выключатели применяются в качестве линейных выключателей или пусковых аппаратов для асинхронных электродвигателей.

а) Пакетные выключатели и переключатели строятся на токи от 10 до 100 *а* с числом полюсов от 1 до 3; они исполняются так же, как двухполюсные переключатели, на два направления.

б) Ручные кнопочные пускатели (выключатели) типа КА-73А на ток до 15 *а* при напряжении до 500 *в*, трехполюсные.

в) Барабанные ручные переключатели серии БП предназначены для включения и переключений в цепях асинхронных электродвигателей мощностью до 2,2 *квт* при 220 *в* и до 3 *квт* при 380 *в*.

Плавкие предохранители предназначены для защиты электрических установок от коротких замыканий и значительных перегрузок.

а) Пробочные предохранители на токи от 6 до 60 *а*.

б) Трубчатые предохранители типа ПР для напряжений до 500 *в* и на токи от 6 до 1000 *а*. Отличаются большим быстродействием и обладают большой разрывной мощностью.

в) Предохранители с кварцевым заполнением патронов на токи от 6 до 600 *а*. Имеют малые габаритные размеры и большую устойчивость к коротким замыканиям.

Воздушные автоматические выключатели применяются для отключения электрических установок при коротких замыканиях, перегрузках и исчезновении или значительном падении напряжения в сети.

а) Автоматы А-25 до 500 *в* на токи от 1,6 до 25 *а*, двух- и трехполюсные, с тепловыми и мгновенными электромагнитными расцепителями.

б) Установочные автоматы серии А-3000 на токи от 15 до 600 *а*, двух- и трехполюсные, с тепловыми и электромагнитными расцепителями. Автоматы на токи до 50 *а* могут быть выполнены однополюсными.

в) Максимальные и максимально-нулевые автоматы серии А-2000 выполняются на токи от 200 до 1500 *а* с 1, 2 и 3 полюсами.

Реостаты пусковые с масляным охлаждением рассчитываются на кратковременную работу и служат для ручного пуска электродвигателей.

Реостаты возбуждения служат для регулирования тока возбуждения машин. Реостаты возбуждения двигателей постоянного тока имеют назначение регулировать скорость вращения. Величина реостата возбуждения характеризуется его объемной мощностью. Для дистанционного управления реостатом он может быть снабжен моторным приводом.

Сопротивления пусковые, тормозные, регулировочные, разрядные и др. В цепях с большими токами (от 20 *а* и выше) применяются чугунные или фехралевые элементы. При токах, не превышающих 40 *а*, часто используют элементы из константановой проволоки или ленты. При небольшой мощности цепи применяются проволочные трубчатые эмалированные сопротивления, которые исполняются на мощности от 15 до

150 *вт* при сопротивлениях трубки от 20 до 50 000 *ом*.

Силовые контроллеры барабанные и кулачковые применяются для пуска, реверсирования и регулирования скорости двигателей повторно-кратковременного режима (главным образом кранов) при постоянном и переменном токе. Барабанные контроллеры применяются при числе включений не более 240 в час. При большей частоте включений используют кулачковые контроллеры.

Плоские контроллеры применяются для управления цепями возбуждения машин. Щетка контроллера снабжается моторным приводом, что позволяет осуществлять дистанционное управление.

Контакторы постоянного тока предназначены для частого дистанционного отключения и включения силовых цепей. Допустимая частота включений — от 600 до 1500 в час. Силовые контакторы строятся на токи от 40 до 600 *а*, контакторы защиты — до 2500 *а*. Катушки на напряжение — до 220 *в*. Контакторы от 75 *а* и выше строятся однополюсными; контакторы на 40 *а* могут иметь несколько главных полюсов с нормально открытыми (н. о.) и нормально закрытыми (н. з.) контактами. К контакторам пристраиваются блок-контакты в количестве до двух н. о. и двух н. з. Модификации контакторов: с н. з. главными контактами, двухполюсные с общей нулевой точкой и др. Малые контакторы применяются иногда как промежуточные реле постоянного тока с числом контактов до 5 н. о. и 5 н. з.

Контакторы переменного тока. Назначение — то же, что и контакторов постоянного тока. Допустимая частота включений от 120 до 600 в час. Строятся на токи от 15 до 600 *а*; катушки на напряжения от 127 до 500 *в*. Обычное исполнение контакторов — трехполюсное, но строятся также контакторы с 1, 2, 4 и 5 полюсами. Блок-контакты: 2 н. о. и 2 н. з. Модификации: со смешанными главными контактами н. о. и н. з.; с катушками, предназначенными для питания постоянным током; с защелкой, т. е. такие, которые удерживаются во включенном положении действием механической защелки. Для отключения такого контактора необходимо кратковременно возбудить соленоид защелки. К контакторам переменного тока могут пристраиваться механические реле времени.

Промежуточные реле постоянного тока имеют несколько н. о. и н. з. контактов и применяются в цепях управления для размножения контактов первичных датчиков.

а) Реле серии РЭ-100. Число контактов до 3. Катушки на напряжение от 24 до 440 *в*. Допускает неограниченное число включений в час. Используется также как реле напряжения, тока, времени.

б) Реле серии ЭП-100. 2 н. о. и 2 н. з. контакта. Катушки на напряжение от 24 до 220 *в*. Малое потребление мощности: 5—7 *вт*.

в) Реле РПО, катушка на 220 *в*. Остальные характеристики те же, что и для реле РПО переменного тока.

г) В качестве промежуточных реле постоянного тока могут применяться кодовые реле КДР, телефонные реле МКУ-48 и др.

Промежуточные реле переменного тока. Общая характеристика та же, что и реле постоянного тока.

а) Реле РПТ-100 с 4 н. о. и 4 н. з. контактами. Катушки на напряжение от 36 до 220 *в*. Допускает до 6000 включений в час.

б) Реле ЭП-41Б с числом независимых контактов до 6 в различных комбинациях. Катушки на напряжение от 24 до 500 *в*.

в) Реле РПМ с 4 н. о. и 4 н. з. контактами. Катушки на напряжение от 12 до 500 *в*. Рассчитано на 600 включений в час при ПВ = 60%.

г) Реле РПО малогабаритное с 2 н. о. и 2 н. з. контактами. Катушки на напряжение до 380 *в*. Допустимое число включений до 500 в час. Мощность контактов невелика.

д) Реле серии РЭ-2100. Два контакта. Катушки на напряжение от 127 до 380 *в*. Исполняется как реле напряжения и максимального тока.

е) В качестве промежуточных реле переменного тока могут применяться телефонные реле типа МКУ-48 при напряжениях до 380 *в*.

Реле тока. Катушки этих реле включаются в главную (силовую) цепь.

а) Реле серии РЭ-100 постоянного тока. Катушки на токи от 1,5 до 600 *а*. Коэффициент возврата ~0,3. Ток втягивания 25—70% номинального.

б) Реле серии РЭ-60 постоянного тока. Имеет один контакт. Катушки от 2,5 до 1500 *а*. Коэффициент возврата ~0,65. Ток втягивания от 28 до 45%.

в) Реле типа РЭ-190 переменного тока, трехкатушечное, с 1 н. о. и 1 н. з. контактами. Предназначено для включения в цепь ротора асинхронного двигателя.

Реле напряжения:

а) Реле серии РЭ-100 постоянного тока. Катушки на напряжения от 12 до 500 *в*. Напряжение втягивания 20—50% номинального. Коэффициент возврата ~0,3.

б) Реле серии РЭ-60 постоянного тока. Катушки на напряжения от 24 до 500 *в*. Напряжение втягивания от 35 до 55%. Коэффициент возврата ~0,65. Имеет один контакт.

в) Реле РЭ-2100 напряжения переменного тока. Применяется как реле нулевое с напряжением отпуска в пределах 60—85% номинального и как реле повышения напряжения с напряжением втягивания от 105 до 120% напряжения сети.

Реле времени:

а) Реле РЭ-100 постоянного тока. Выдержка времени от 0,25 до 0,9 сек.

б) Реле серии РЭ-180 постоянного тока. Выдержка времени от 1 до 5 сек. Имеет 2 контакта. Катушки от 48 до 500 *в*.

в) Реле переменного тока РЭ-218. Катушки от 110 до 380 *в*. Выдержка времени от 7 до 17 сек.

г) Моторные реле времени переменного тока типа Е-52 и РВТ-1200. Напряжение 220 *в*. Выдержка времени от 1 до 60 сек. и от 1 до 20 мин. Имеет 2 н. о. и 1 н. з. контакты.

д) Маятниковое реле времени РВМ2 переменного тока. Напряжение катушек от 12 до 500 *в*. Выдержка времени от 2 до 10 сек.

е) Пневматическое реле времени РВП-1 переменного тока. Напряжение катушек от 12 до 380 *в*. Выдержка времени от 0,4 до 180 сек. Имеет 2 контакта с выдержкой времени и 2 контакта мгновенного действия.

ж) Электронное реле времени серии РВЭ2. Выдержки времени от 10 до 175 сек. Предназначено для включения в сеть переменного тока с напряжением 127, 220 или 380 *в*.

Реле счета импульсов типа РСИ-1000. Уставка в пределах от 3 до 1000 импульсов. Номинальное напряжение 220 *в* переменного тока.

Реле контроля скорости типа РКС предназначено для управления торможением противовключением асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Рассчитано для работы до 3000 об/мин приводного электродвигателя.

Реле контроля технологических параметров. Промышленность выпускает разнообразные типы этих реле. Некоторые из них перечислены ниже.

а) Реле уровня жидкости для открытых сосудов, для колодцев и канализации; сигнализаторы уровня жидкости типа СУ-1.

б) Реле давления для контроля пневматических и смазочных систем с параметрами от 1 до 25 *кГ/см²*.

в) Реле давления дифференциальное типа ДРД-1.

г) Струйное реле, приходящее в действие при протекании жидкости в трубопроводе.

д) Температурное реле ТР-200 с пределами действия от +20 до +200° С.

Реле максимальной защиты:

а) Мгновенное максимальное электромагнитное реле постоянного тока типа РЭ-70. Исполняется с одним контактом с самовозвратом, ручным или электромагнитным возвратом контактов. Катушки от 2,5 до 1200 *а*.

б) Максимальное мгновенное реле переменного тока типа РЭ-2100. Катушки на токи от 5 до 600 *а*.

в) Максимальное двухкатушечное реле переменного тока типа Р-4000 с катушками от 20 до 300 *а*.

г) Тепловые реле — служат для защиты электродвигателей от перегрузки. Исполняются на токи до 200 *а*.

Путевые и конечные выключатели:

а) Выключатели кнопочного типа серии ВК-100; имеют до 2 контактов без моментного выключения.

б) Рычажный конечный выключатель типа ВК-211 с 1 н. о. и 1 н. з. контактами с моментным выключением.

в) Микропереключатели с 1 н. о. и 1 н. з. контактами с моментным переключением. Имеют очень малые размеры.

г) Рычажные путевые (конечные) выключатели серии КУ-130 (крановые) с 2 контактами в любых комбинациях. Отличаются значительными габаритами.

д) Выключатели типа ВУ-150 и ВУ-250 поставляются комплектно с редуктором и сочленяются с одним из вращающихся валов механизма. Допускают регулировку угла срабатывания.

е) Регулируемые кулачковые выключатели (командоаппараты) серии КА-4000

связываются с механизмом непосредственно или через редуктор. Исполняются на 4, 6, 8, 16 и 24 цепи.

ж) Электромагнитные, индукционные и электронные путевые выключатели, приходящие в действие без непосредственного механического воздействия механизма.

Командоаппараты. К их числу относятся кнопочные станции, командоконтроллеры, переключатели управления. Эти аппараты рассчитаны для включения их в цепи управления.

а) Кнопочные станции выполняются в открытом, защищенном и водозащищенном исполнениях для стационарной установки и в подвесном исполнении (станки, тельферы, кран-балки). Подвесные кнопочные станции имеют до 12 элементов, часть которых может быть занята сигнальными лампами и переключателями управления.

Кнопки имеют обычно 1 н. о. и 1 н. з. контакты.

б) Командоконтроллеры представляют собой многопозиционные многоцепные переключатели управления с количеством независимых цепей до 14 и с общим числом положений до 15. Предназначены для установки в цехах для дистанционного управления напряженно работающими двигателями (краны, металлургические механизмы и др.).

в) Переключатели управления (универсальные переключатели УП, станочный крестовый переключатель КП1, переключатель управления ПУ, тумблер и др.) имеют различное число цепей и положений. Предназначены для установки на пультах и панелях (УП, ПУ) непосредственно на станках (КП1), в корпусах кнопочных станций и других местах (тумблер).

Электромагниты.

а) Трехфазные тормозные длинноходовые электромагниты типа КМТ. Напряжение 220, 380 и 500 *в*. Тяговые усилия до 125 *кГ* при ходе до 80 *мм* при ПВ = 100%.

б) Тормозные длинноходовые электромагниты постоянного тока серии КМП и брызгонепроницаемой серии ВМ. Тяговые усилия до 130 *кГ* при ПВ = 25%. Ход якоря до 150 *мм*.

в) Короткоходовые тормозные электромагниты серий МО переменного тока и МП постоянного тока.

г) Однофазные электромагниты переменного тока серии ЭС с тяговым усилием до 25 *кГ* при ходе 30 *мм*.

Аппаратура сигнализации.

а) Арматуры для сигнальных ламп с различным цветом колпачков. Предназначены для монтажа на щитах и пультах, а также для встройки в корпуса кнопочных станций.

б) Аппаратура акустической сигнализации постоянного и переменного тока — звонки, гудки, сирены, зуммеры.

Магнитные пускатели. Нереверсивные включают в себя один трехполюсный контактор переменного тока и тепловое реле (последнее может отсутствовать). Реверсивные магнитные пускатели имеют два механически сблокированных контактора. Применяются для пуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 55 *квт* при напряжении 380 *в*.

Станции управления. Представляют собой комплектные панели с релейно-контакторной и защитной аппаратурой и со всеми соединениями. Станции предназначаются для управления асинхронными и синхронными электродвигателями переменного тока и двигателями постоянного тока.

СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Начертание релейно-контакторных схем

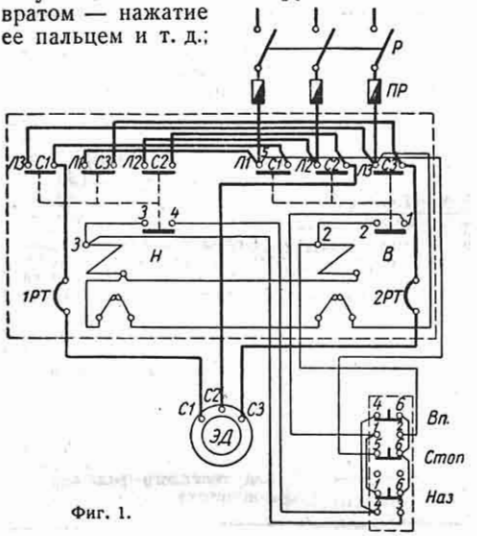
Схемы релейно-контакторного управления могут быть начерчены либо как совмещенные, либо как элементные (развернутые). В совмещенных схемах все элементы каждого аппарата или машины на чертеже размещаются так, как они расположены в натуре. По принципу совмещенных схем чертятся монтажные схемы. Например, на фиг. 1 изображена монтажная схема управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем при помощи реверсивного магнитного пускателя и кнопочной станции. Даже и в этом простом случае совмещенная схема получается довольно запутанной.

При проектировании электропривода вычерчивается элементная (развернутая) схема, которая облегчает уяснение работы установки и взаимодействия отдельных аппаратов. Элементная схема часто называется принципиальной схемой. Ниже приводятся основные правила начертания элементных схем:

а) на схеме изображаются все элементы (катушки, контакты, обмотки)

всех аппаратов и машин, входящих в схему;

б) контакты всех аппаратов изображаются в нормальном положении, т. е. таком, когда на аппарат не производится внешних воздействий; для электромагнитного аппарата внешним воздействием является возбуждение его катушки, для кнопки с пружинным возвратом — нажатие ее пальцем и т. д.;



Фиг. 1.

в) отдельные элементы различных аппаратов размещаются на чертеже схемы не в соответствии с их действительным расположением, а исключительно по соображениям удобства общей обозреваемости схемы и наиболее наглядного выявления отдельных цепей тока;

г) каждый аппарат в данной схеме должен иметь только ему присущее обозначение. Все элементы одного и того же аппарата в развертке схемы обозначаются одинаково; для разных элементов одного и того же аппарата вводятся графические символы;

д) все силовые цепи на схеме вычерчиваются толстыми линиями, все цепи управления — тонкими линиями.

Для обозначения аппаратов в элементных схемах пользуются функциональной буквенной системой, согласно которой каждый аппарат обозначается одной или несколькими начальными буквами слов, выражающих функцию, выполняемую данным аппаратом в схеме, но не наименование конструктивного типа аппарата. Если таких аппаратов имеется несколько, перед функциональным обозначением ставится порядковый номер аппарата. Так как одну и ту же функцию могут выполнять и контакторы, и реле, перед функциональным буквенным обозначением реле всегда ставится буква *Р*. Ниже приведены часто встречающиеся функциональные обозначения аппаратуры.

Функциональные обозначения аппаратов для элементных схем

А. Контакторы

В — ход вперед, вверх
ДТ — динамического торможения
КБ — блокировочный
КП — промежуточный
КФ — форсировки
Л — линейный
Н — ход назад, вниз
П — противовключения
Т — тормозной
У — ускорения
УП — управления полем

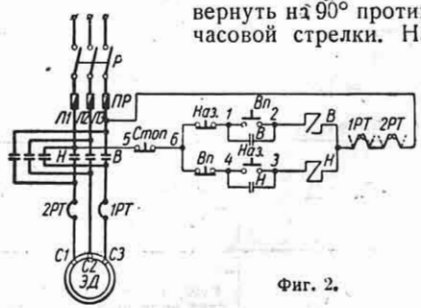
Примечание. Контакторы, управляющие включающими соленоидами высоковольтных выключателей, называются релейными и перед функциональным обозначением выключателя имеют две буквы *КР*. Например, релейный контактор выключателя нулевой точки обозначается *КРН*.

Б. Реле

РБ — блокировочное
РВ — времени
РК — контроля
РМ — максимальное, мгновенное
РН — нулевое, напряжения
РНТ — нулевое токовое
РП — противовключения, промежуточное
РПВ — противовключения для хода вперед
РПН — противовключения для хода назад
РС — сигнальное, скольжения
РТ — тепловое, торможения
РУ — ускорения
РУП — ускорения полем
РФ — форсировки

В табл. 1 приведены наиболее употребительные графические символы для изображения элементов аппаратов в развернутых схемах.

Эти символы предназначены для схем с горизонтальным расположением цепей. При вертикальном их расположении указанные в таблице символы нужно повернуть на 90° против часовой стрелки. На

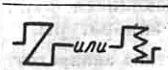
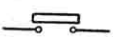
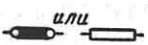


Фиг. 2.

фиг. 2 приведена элементная схема реверсивного управления короткозамкнутым

Таблица 1

Графические символы для элементных схем

Графический символ элемента	Наименование	Графический символ элемента	Наименование
	Катушка контактора		Нормально открытый контакт реле времени с выдержкой при закрывании
	Параллельная катушка реле без демпфера		Нормально закрытый контакт реле времени с выдержкой при закрывании
	Параллельная катушка реле с демпфером		То же, но с выдержкой при открывании
	Последовательная катушка реле без демпфера		Нормально открытый контакт максимального токового или теплового реле без самовозврата
	Последовательная катушка реле с демпфером		То же с самовозвратом
	Параллельная обмотка машины		Нормально закрытый контакт максимального токового или теплового реле без самовозврата
	Последовательная обмотка машины		То же с самовозвратом
	Нагревательный элемент теплового реле		Нормально закрытый контакт путевого или конечного выключателя
	Нормально открытый (н. о.) главный контакт контактора без гашения		То же, но нормально открытый контакт
	Нормально закрытый (н. з.) главный контакт контактора без гашения		Нормально открытый контакт кнопки с самовозвратом
	Нормально открытый блок-контакт контактора или нормально открытый контакт реле		Нормально закрытый контакт кнопки с самовозвратом
	Нормально закрытый блок-контакт контактора или нормально закрытый контакт реле		Контакт командноконтроллера или переключателя управления
	Нормально открытый контакт реле времени с выдержкой при открывании		Сопротивление активное

электродвигателем, монтажная схема которого дана на фиг. 1. При нажатии кнопки *ВП* втягивается контактор *В*, главными контактами подключает двигатель к сети, а блокконтактом *В 1—2* шунтирует кнопку *ВП*, после чего она может быть отпущена. Н. з. контакты кнопки *ВП 6—4* служат для блокировки цепи катушки *Н*. Кроме того, контакторы *В* и *Н* имеют механическую блокировку, не допускающую одновременного включения обоих контакторов, что привело бы к короткому замыканию главной цепи. При перегрузке двигателя размыкаются контакты теплового реле, что приводит к отключению двигателя от сети.

Магнитный пускатель осуществляет нулевую защиту двигателя, исключающую самопроизвольный пуск двигателя после его остановки по причине хотя бы кратковременного значительного снижения или полного исчезновения напряжения сети.

Общая характеристика релейно-контакторных схем

Релейно-контакторному управлению электродвигателями свойственны следующие существенные достоинства:

а) дистанционное управление электродвигателем, который может быть удален от пункта управления на весьма значительное расстояние — десятки и даже сотни метров;

б) возможность управлять электродвигателем с нескольких мест;

в) элементарная простота операций управления (нажатие кнопки, поворот рукоятки командоаппарата), вследствие чего при релейно-контакторном управлении от оператора не требуется никакой электротехнической квалификации;

г) автоматизация отдельных операций управления: закорачивания ступеней пусковых реостатов двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазовым ротором, замедления или ускорения в определенных точках пути приводимого механизма, торможения, остановки, реверса, что приводит к увеличению надежности работы установки, так как исключается возможность ошибочных действий оператора;

д) легкость устройства всякого рода защит, что обусловливает повышение надежности и безопасности обслуживания двигателей и механизмов;

е) блокировка с другими электродвигателями и механизмами, автоматизация работы комплекса взаимосвязанных технологически механизмов;

ж) возможность устройства разного рода сигнализации;

з) автоматизация пуска и останова двигателей в зависимости от изменения технологических параметров: уровня жидкостей, давления жидкостей и газов, протекания жидкостей, скорости вращения механизмов, температуры среды и т. д.;

и) возможность централизации управления многими механизмами даже при напряженном режиме их работы.

В сочетании с электромашинным управлением и разного рода автоматическими регуляторами открываются широкие возможности автоматического непрерывного регулирования многих технологических процессов и величин в очень широких пределах, а также строгой стабилизации их (например, скорости вращения двигателя).

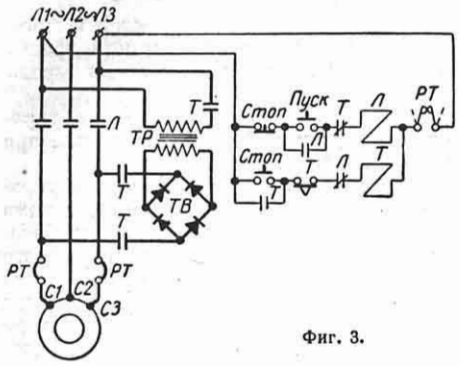
Типовые схемы для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором

Короткозамкнутый асинхронный электродвигатель является наиболее простым, дешевым и надежным из всех остальных двигателей. В большинстве случаев пуск его производится непосредственным подключением к сети трехфазного переменного тока. Для реверсирования асинхронного электродвигателя необходимо переключить два фазных провода.

Для дистанционного прямого пуска короткозамкнутых электродвигателей применяются магнитные пускатели. Нереверсивный магнитный пускатель включает в себя трехполюсный контактор и тепловые реле. Реверсивный магнитный пускатель имеет не один, а два контактора. На фиг. 2 приведена соответствующая схема.

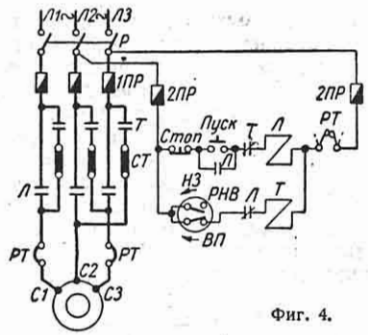
Для быстрой остановки привода может применяться электрическое торможение динамическое или противовключения. На фиг. 3 дана схема динамического торможения короткозамкнутого двигателя. Пуск двигателя производится обычно кнопкой. При нажатии кнопки *Стоп*, которая имеет два контакта, двигатель отключается от сети линейным контактором *Л*, после чего включается тормозной контактор *Т*. Статор подключается

к постоянному току от выпрямителя *ТВ*. Торможение длится в течение выдержки времени реле, пристроенного к контактору. Контакторы *Л* и *Т* сблокированы н. з. блок-контактами. Одновременное включение обоих контакторов могло бы привести к выходу из строя выпрямителя.



Фиг. 3.

Схема торможения противовключением, представленная на фиг. 4, не нуждается в постоянном токе, но требует применения специального реле направления вращения *РНВ*. Реле механически

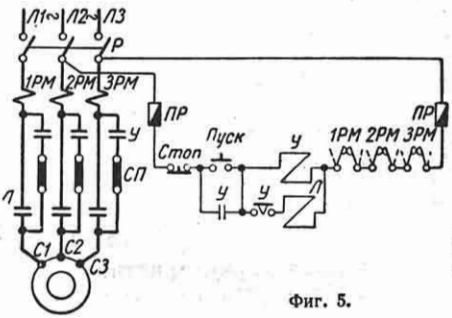


Фиг. 4.

связывается с валом двигателя. Оба контакта его при неподвижном роторе разомкнуты. При вращении двигателя вперед замыкается нижний контакт, при вращении назад — верхний. Допустим, что двигатель работает, и замкнут нижний контакт реле *РНВ*. При нажатии кнопки *Стоп* контактор *Л* отключается и своим н. з. контактом замкнет цепь катушки *Т*. У двигателя переключатся две фазы, т. е. он будет быстро затормаживаться в режиме противовключения. Реле *РНВ* отключит двигатель при скорости, близкой к нулю, не позволяя двигателю реверсироваться. Сопротивление *СТ* введено для уменьшения тормозного тока.

При необходимости уменьшить ток сети при пуске двигателя прибегают к понижению напряжения.

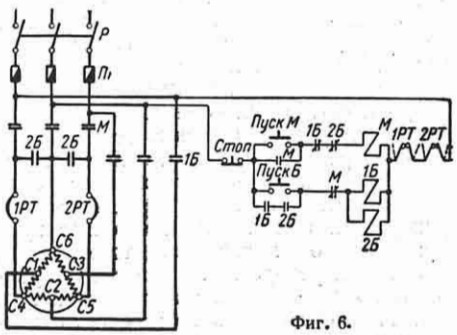
Наиболее простым и широко распространенным способом снижения пускового напряжения для низковольтных двигателей является введение в цепь статора активного сопротивления. Соответствующая схема представлена на фиг. 5. При нажатии пусковой кнопки первым включается контактор *У*, подключая двигатель сети последовательно



Фиг. 5.

с сопротивлением *СП*. Затем с выдержкой времени, обусловленной пристроенным к контактору *У* маятниковым реле, включается контактор *Л*, который закорачивает сопротивление *СП* и подключает тем самым двигатель на полное напряжение сети.

Нужно иметь в виду, что во всех случаях при пониженном напряжении значительно снижается пусковой момент двигателя.



Фиг. 6.

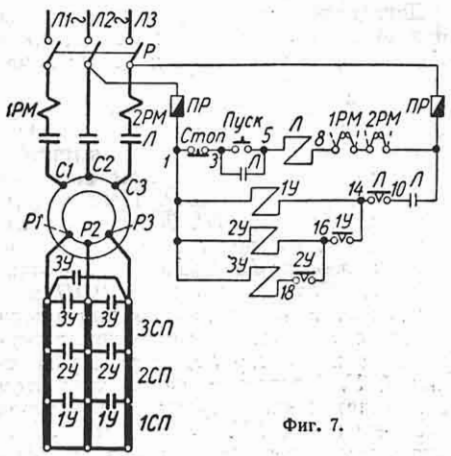
На фиг. 6 приведена схема нереверсивного управления двухскоростным электродвигателем. Для получения малой скорости нажимается кнопка *Пуск МТ*.

и обмотки статора соединяются треугольником (сеть подводится к зажимам *С4, С5 С6*); для получения большой скорости включаются контакторы *1Б* и *2Б*, и обмотки соединяются двойной звездой. В таких схемах отношение скоростей получается равным 1:2 (750:1500 или 1500:3000).

При напряженном режиме (большом числе включений в час) аппаратура переменного тока работает недостаточно надежно, в связи с чем в этих случаях применяются контакторы и реле постоянного тока, катушки которых получают питание от отдельного источника.

Контакторное управление асинхронными электродвигателями с фазовым ротором

Пуск электродвигателей с фазовым ротором всегда производится путем закорачивания по ступеням сопротивлений, включаемых на время пуска в цепь ротора. На фиг. 7 представлена нереверсивная схема кнопочного управления с ускорением в функции времени. После нажатия кнопки *Пуск* включается контактор *Л*, и двигатель начинает вращаться с включенным полным сопротивлением в роторе, так как контакторы *1У, 2У,*



Фиг. 7.

3У открыты. К контактору *Л* пристроено маятниковое реле, контакт которого *10—14* с определенной выдержкой времени закроется и включит контактор *1У*. После этого, с выдержками времени аналогично закроются контакторы *2У* и *3У*, и двигатель будет вращаться с полной скоростью.

При большой частоте включений в качестве реле ускорения применяются электромагнитные реле времени постоянного тока, питаемые через выпрямители.

При ускорении в функции времени контакторы ускорения *1У, 2У, 3У* закрываются через определенные промежутки времени, не зависящие ни от тока двигателя, ни от его скорости. Этот метод управления ускорением очень прост и надежен. Он получил исключительно широкое распространение в промышленной практике. Применяются, хотя и редко, методы управления ускорением в функции тока и скорости. Схемы, использующие эти методы, значительно менее надежны в эксплуатации и более чувствительны к колебаниям напряжения сети. Кроме того, схемы с управлением в функции тока отличаются значительной сложностью.

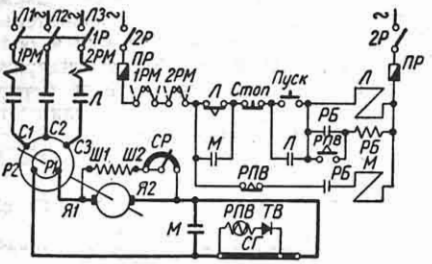
Схема синхронного электродвигателя

Для привода механизмов с длительным режимом работы, не требующих регулирования скорости, все чаще применяются синхронные двигатели, которые строятся в диапазоне мощностей от нескольких десятков до нескольких тысяч киловатт. Двигатели небольших мощностей строятся на напряжения 220, 380, 500 *в*, больших мощностей — на 3, 6, 10 *кв*.

Запуск синхронных двигателей, как и короткозамкнутых асинхронных, может производиться либо при полном, либо при пониженном напряжении сети. Выбор способа пуска синхронных двигателей определяется теми же соображениями, что и короткозамкнутых асинхронных.

При прямом пуске после подключения статора синхронного двигателя к сети последний разворачивается в асинхронном режиме с замкнутой на сопротивление обмоткой возбуждения до подсинхронной скорости. Затем обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока, и двигатель втягивается в синхронизм. При пуске с пониженным напряжением возбуждение может включаться либо на ступени пониженного напряжения (легкий пуск), либо после подключения статора к полному напряжению сети (тяжелый пуск). В отдельных случаях запуск синхронных двигателей производится с наглухо подключенным возбудителем.

На фиг. 8 приведена схема прямого пуска синхронного двигателя низкого напряжения. Наиболее ответственным узлом схемы является реле подачи возбуждения *РПВ*, включающее контактор возбуждения *М* при достижении двигателем подсинхронной скорости. В процессе пуска обмотка возбуждения включена на якорь возбудителя последовательно с большим сопротивлением *СГ*. При нажатии кнопки *Пуск* включится контактор *Л*, подключая статор двигателя к сети. После этого включается *РПВ* и своим н. з. контактом размыкает цепь



Фиг. 8.

катушки контактора *М*, а вторым н. о. контактом включает реле *РБ*. При достижении двигателем подсинхронной скорости реле *РПВ* отпадает, включая контактор возбуждения *М*. Сопротивление *СГ* закорачивается, и обмотка возбуждения двигателя подключается к полному напряжению возбудителя. Двигатель втягивается в синхронизм.

Схема предусматривает защиту от затянувшегося пуска н. з. контактом маятникового реле, пристроенного к контактору *Л*.

Эта защита предохраняет пусковую короткозамкнутую обмотку двигателя от чрезмерного перегрева, что могло бы иметь место при ненормально большой длительности пуска.

Реле *РБ* с н. о. контактом *РПВ* контролирует исправность действия реле *РПВ*.

Для синхронных двигателей высокого напряжения применяются высоковольтные выключатели с соленоидными приводами и дополнительно предусматривается защита от обрыва цепи возбуждения и контроль исправности цепи отключения.

Цепи управления этих двигателей питаются постоянным током от независимого источника.

Схемы электродвигателей постоянного тока

Электродвигатели постоянного тока, являясь более сложными и дорогими, находят все же значительное применение в промышленных приводах, так как они обладают рядом ценных качеств.

Двигатели последовательного и смешанного возбуждения обладают большой перегрузочной способностью и большим пусковым моментом. Эти свойства очень важны при напряженном повторно-кратковременном режиме с большим числом включений в час (больше 300—400). В то же время у этих двигателей легко получить интенсивное электрическое торможение (противовключением, динамическое) и путем включения сопротивлений и переключения обмоток — очень малые (ползучие) скорости как в двигательном, так и в тормозном режимах.

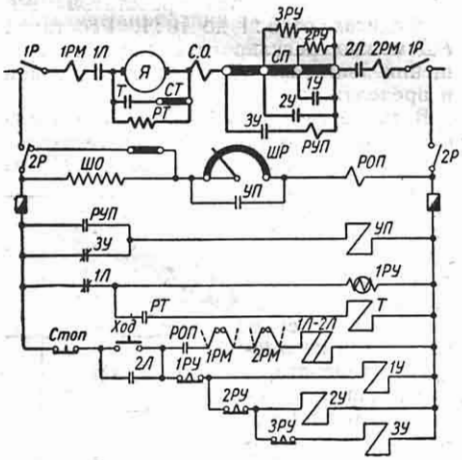
Двигатели постоянного тока параллельного возбуждения обладают весьма ценным качеством электрического регулирования скорости вверх от номинальной в пределах до 1 : 4 без дополнительных потерь. Допустимая мощность, развиваемая при таком регулировании, остается примерно постоянной, т. е. момент на валу двигателя при увеличении скорости соответственно падает.

Двигатели независимого возбуждения применяются в системах генератор — двигатель, в том числе и с электромашинным управлением.

На фиг. 9 представлена схема нереверсивного управления двигателем параллельного возбуждения, предусматривающая регулирование скорости вверх от основной реостатом *ШР*. После замыкания рубильников *1Р*, *2Р* обмотка возбуждения *ШО* подключается к сети, причем реостат *ШР* закорочен контактом *УП*. Реле обрыва поля *РОП* возбуждается, замыкая свой контакт в цепи катушек *1Л—2Л*. Одновременно возбуждается контактор *УП* и реле ускорения *1РУ*. Последнее своим контактом размыкает цепь катушек контакторов ускорения *1У*, *2У*, *3У*. В этой схеме предусмотрено автоматическое управление ускорением в функции времени при помощи электромагнитных реле времени *1РУ*, *2РУ*, *3РУ* и динамическое торможение при остановке при помощи реле *РТ* и контактора *Т*.

При нажатии кнопки *Ход* включаются контакторы *1Л*, *2Л*, двигатель подключается к сети последовательно со всеми

тремя секциями пускового сопротивления при полном магнитном потоке, так как закрыт контактор *УП*. Одновременно возбуждаются реле *2РУ* и *3РУ*, открывая свои контакты в цепях *2У* и *3У*, и теряет возбуждение *1РУ*, с выдержкой времени замыкая свой контакт в цепи катушки контактора *1У*. Последний включается, закорачивая первую секцию пускового сопротивления и катушку *2РУ*. Двигатель ускоряется. С выдержкой времени после этого закрывается контакт *2РУ*, и включается контактор *2У*, который закорачивает вторую секцию пускового сопротивления и катушку *3РУ*. Наконец, с выдержкой времени включится контактор *3У*, подключит якорь двигателя к полному напряжению сети, введет в действие катушку реле управления полем *РУП* и своим н. з. блок-контактом разомкнет цепь катушки *УП*. Если ток в якоре большой, реле *РУП* втянет и своим контактом будет держать контактор *УП* втянутым. По мере ускорения двигателя ток его будет уменьшаться, и когда он сделается меньше тока отпуска *РУП*, реле выпадет, отключит *УП* и тем самым включит в цепь *ШО*

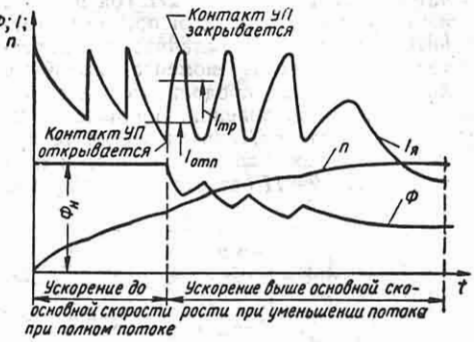


Фиг. 9.

реостат возбуждения *ШР*. Это вызовет ускорение двигателя и увеличение тока в его цепи, вследствие чего *РУП* снова втянет, и реостат *ШР* зашунтируется контактом *УП*. Попеременное включение и отключение *ШР* будет происходить до тех пор, пока скорость двигателя не увеличится до значения, определяемого положением рукоятки *ШР*.

На фиг. 10 приведен график, поясняющий работу реле *РУП*.

В процессе разворота двигателя втягивается реле *РТ*. Поэтому после нажатия



Фиг. 10.

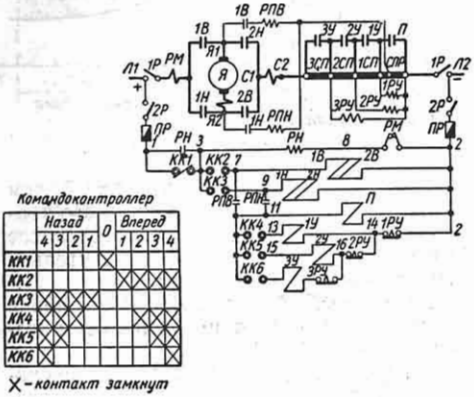
кнопки *Стоп* втянет контактор *Т*, чем будет создан контур динамического торможения, которое прекратится после того, как скорость двигателя значительно уменьшится и *РТ* выпадет.

Реле *РОП* служит для отключения двигателя от сети при обрыве цепи возбуждения его.

На фиг. 11 приведена схема реверсивного управления двигателем последовательного возбуждения с ускорением в функции времени (электромагнитные реле времени *1РУ*, *2РУ*, *3РУ* и контакторы *1У*, *2У*, *3У*) и торможением противовключением (реле напряжения *РПВ*, *РПН* и контактор *П*). В качестве командного аппарата применен командоконтроллер.

В нулевом положении командоконтроллера возбуждено реле *РН*. При быстром переводе рукоятки командоконтроллера в четвертое положение вперед немедленно закроются контакторы *1В — 2В*, и двигатель подключится к сети последовательно со всеми сопротивлениями. Падение напряжения на секциях *СПР*, *1СП* и *2СП* заставит втянуться реле *1РУ*, *2РУ*, *3РУ*, которые откроют свои контакты в цепях катушек контакторов ускорения. Одновременно включится реле *РПВ* и своими контактами *7 — 11* подключит катушку контактора *П*. Последний втянется и закоротит секцию сопротивления противовключения *СПР* и катушку реле *1РУ*. Далее аналогично предшествующей схеме, с выдержками времени закроются контакторы *1У*, *2У*, *3У*, и двигатель будет вращаться с полной скоростью.

Переведем теперь рукоятку командоконтроллера в четвертое положение назад. При переходе через нуль отключатся все контакторы, а затем включатся контакторы *1Н — 2Н*. Ток в якоре изменит направление, и поэтому изменится направление развиваемого двигателем вращающего момента, якорь же двигателя будет продолжать вращаться в прежнем направлении. Напряжение на катушке реле *РПН* оказывается теперь недостаточным для втягивания, и контакт *РПН 9—11* остается разомкнутым.



Фиг. 11.

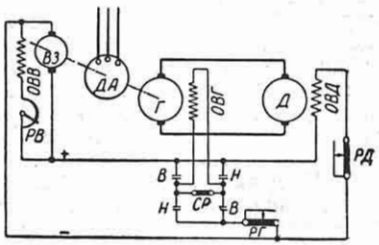
Этим обеспечивается включение последовательно с якорем в процессе торможения противовключением не только всех пусковых сопротивлений, но и добавочной секции *СПР*. При скорости, близкой к нулю, реле *РПН* втягивается, включается контактор *П*, и если не поставить командоконтроллер на нуль, двигатель начнет теперь разворачиваться в обратном направлении.

При постановке командоконтроллера в одно из промежуточных положений двигатель будет вращаться с уменьшенной скоростью.

Система генератор — двигатель

Электропривод по системе генератор — двигатель (г—д) применяется в случаях, когда механизм требует широкой регулировки скорости, а также при частых пусках и реверсах.

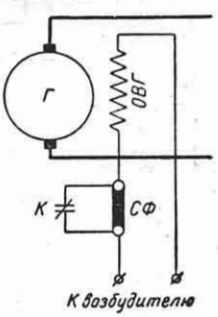
На фиг. 12 представлена принципиальная схема системы г—д для реверсивного управления механизмом, приводимым в движение двигателем *Д* с независимым возбуждением, который получает питание от генератора *Г*. Возбуждение его также независимое. Обмотки возбуждения обеих машин питаются от возбудителя *Вз*. Генератор *Г* и возбудитель *Вз*



Фиг. 12.

сидят на общем валу с двигателем агрегата *ДА* (обычно асинхронным). Агрегат вращается все время с неизменной скоростью. Для пуска двигателя *Д* включаются контакторы *В* или *Н*. Генератор возбуждается, на двигатель *Д* подается напряжение, и он приходит во вращение. Направление вращения *Д* зависит от полярности *Г*, т. е. от того, включен ли контактор *В* или *Н*. Регулирование скорости двигателя от минимальной до основной производится реостатом *РГ* в пределах от 6:1 до 10:1. Реостатом *РД* можно регулировать скорость вращения двигателя *Д* вверх от основной в пределах до 1:4.

В схеме фиг. 12 запуск двигателя при отсутствии реостата *РГ* производится в одну ступень включением *ОВГ* на полное напряжение возбудителя. Максимум тока главной цепи и длительность разгона двигателя *Д* определяются естественными параметрами генератора, двигателя и маховым моментом механизма. Для ускорения процесса пуска, а также и реверса применяется форсировка возбуждения генератора (фиг. 13). Номинальное напряжение *ОВГ* выбирается меньшим, чем напряжение возбудителя:



Фиг. 13.

$$\alpha U_{нвг} = U_{возб}.$$

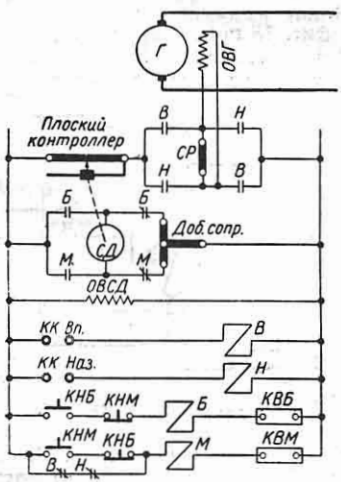
Здесь $U_{нвг}$ — номинальное напряжение *ОВГ*; $U_{возб}$ — напряжение возбуди-

теля; α — коэффициент форсировки, который может достигать значения 3 — 4.

При пуске контакт *К* замкнут, и на обмотку возбуждения *ОВГ* подается повышенное напряжение, что убыстряет процесс нарастания тока возбуждения генератора, а следовательно и скорости вращения двигателя. Когда напряжение генератора достигает номинального, форсировка снимается, т. е. контакт *К* размыкается.

Форсировка увеличивает максимальный пик тока в главной цепи, что и ограничивает ее величину. Это же обстоятельство заставляет иногда прибегать к дефорсировке ($\alpha < 1$) на время пуска или реверса, с тем чтобы удержать ток главной цепи в допустимых пределах.

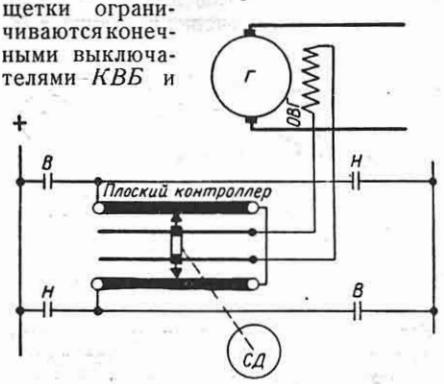
Если требуется плавный продолжительный пуск механизма, управление полем генератора производится с помощью плоского контроллера или реостата с моторным приводом. Схема такого управления представлена на фиг. 14. Здесь сопротивление плоского контроллера включено последовательно с *ОВГ*. При необходимости глубокой регулировки тока возбуждения генератора (широкие пределы регулирования скорости двигателя)



Фиг. 14.

обмотку возбуждения его *ОВГ* целесообразно включать по потенциометрической схеме, как показано на фиг. 15.

Направление вращения двигателя *Д* задается включением контакторов *В* или *Н*, включаемых командоконтроллером *ККВп* или *ККНаз*. Изменение скорости вращения двигателя производится путем перемещения щетки плоского контроллера серводвигателем *СД*, который управляется контакторами *В* и *Н* от кнопок *КНБ* и *КНМ*. Крайние положения щетки ограничиваются конечными выключателями *КВБ* и



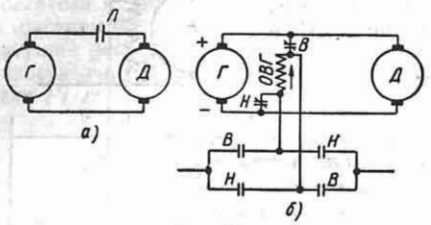
Фиг. 15.

КВМ. При отключении двигателя щетка автоматически возвращается в крайнее положение, соответствующее минимуму напряжения генератора (н. з. блок-контакты *В* и *Н*). Этим обеспечивается всегда плавный запуск двигателя.

При наличии разрядного сопротивления отключение *ОВГ* от возбудителя приводит к постепенному затуханию тока возбуждения, а следовательно и магнитного потока генератора. Э. д. с. двигателя, который продолжает вращаться по инерции, теперь превысит э. д. с. генератора, направление тока в главной цепи изменится, т. е. будет происходить интенсивное торможение двигателя и приводимого им механизма.

Даже после затухания тока возбуждения генератора вследствие остаточного магнетизма генератор будет развивать небольшую э. д. с., которая вызовет ток в главной цепи. Этот ток может быть достаточным для приведения в движение двигателя *Д* с небольшой скоростью. Поэтому одновременно с отключением обмотки *ОВГ* предусматривают либо разрыв главной цепи особым контактором, как это показано на схеме фиг. 16, *а*, либо гашение поля генератора по схеме фиг. 16, *б*. При включении контактора *В* ток через обмотку возбуждения течет так, как показано стрелкой. При этом генератор имеет указанную на схеме полярность. При отключении контактора *В* обмотка возбуждения *ОВГ* подклю-

чится на якорь генератора, причем ток через нее будет теперь протекать в обратном направлении, размагничивая генератор. Протекание тока через *ОВГ* прекратится только при полном размагничивании генератора. Аналогично будет протекать процесс гашения поля генератора и после отключения контактора *Н*.



Фиг. 16.

Если предусматривается торможение путем замыкания *ОВГ* на разрядное сопротивление, гашение поля должно вступать в действие лишь после окончания процесса торможения.

Элементы схем электромашинного управления

Электромашинные усилители (ЭМУ) могут использоваться в качестве:

а) генераторов, питающих небольшие электродвигатели постоянного тока;

б) возбудителей генераторов, в том числе и в системе г—д;

в) подвозбудителей при каскадной системе возбуждения генераторов в системе г—д;

г) регуляторов скорости, тока, напряжения, мощности и т. д., причем весьма часто один ЭМУ совмещает в себе функции и регулятора, и возбудителя (или генератора).

Применением электромашинного управления электроприводом может быть получено:

а) расширение пределов электрического регулирования скорости двигателя до 1000 : 1 и более;

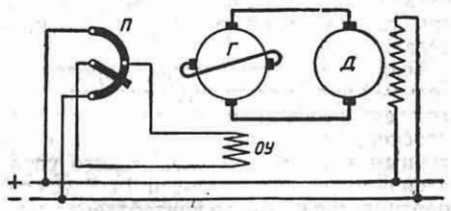
б) стабилизация скорости электродвигателя при любом изменении его нагрузки;

в) автоматическое управление переходными процессами электропривода с целью получения наименьшего времени пуска или торможения, что при напряженном повторно-кратковременном режиме обусловливает увеличение производительности оборудования;

г) автоматическое регулирование скорости, тока, напряжения, мощности двигателя в функции любых величин, могущих быть преобразованными в электрический ток или напряжение;

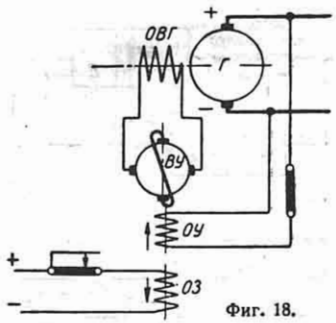
д) увеличение надежности схем вследствие сокращения количества релейно-контакторной аппаратуры и уменьшения ее габаритов.

На фиг. 17 приведена простейшая схема применения ЭМУ с поперечным возбуждением, питающего электродвигатель *Д*. Обмотка возбуждения (управления) ЭМУ питается от постороннего источника через потенциометр *П*. Направление вращения и величина скорости *Д* зависят от положения рукоятки потенциометра относительно средней точки его и удаления рукоятки от этой точки.



Фиг. 17.

На фиг. 18 приведена схема, где показано использование ЭМУ в качестве возбудителя генератора и одновременно регулятора его напряжения. Одна из обмоток ЭМУ—*ОЗ* (задающая) получает питание от постороннего источника. Вторая обмотка ЭМУ—*ОУ* подключена на якорь генератора. Действующая результирующая намагничивающая сила (н. с.) равна разности н. с. обеих обмоток. При уменьшении напряжения генератора н. с. обмотки *ОУ* уменьшается, что приводит к увеличению

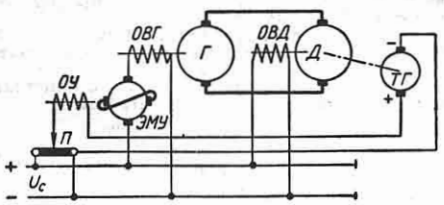


Фиг. 18.

результирующей н. с. усилителя и увеличению возбуждения генератора. Увеличение напряжения генератора приводит к обратному результату.

Схемы, в которых существует функциональная зависимость входной величины (в данном случае результирующей н. с. ЭМУ) от регулируемого параметра (в данном случае напряжения генератора), называются схемами с обратной связью. Обратная связь называется отрицательной, если возрастание выходной величины вызывает уменьшение входной величины (или обратно). Если возрастание выходной величины вызывает также возрастание входной, такая обратная связь называется положительной. Схемы с отрицательной обратной связью обладают очень ценным свойством саморегулирования. На фиг. 18 благодаря наличию отрицательной обратной связи напряжение генератора регулируется автоматически.

На фиг. 19 приведена схема стабилизации скорости двигателя *Д*, питаемого отдельным генератором *Г*, обмотка возбуждения которого последовательно с якорем ЭМУ подключена к стабилизованному напряжению U_c. Обмотка управления ЭМУ подключена последовательно с тахогенератором *ТГ*, включенным встречно. Если скорость двигателя равна заданной, э. д. с. тахогенератора равна напряжению на *ОУ*, и э. д. с. ЭМУ



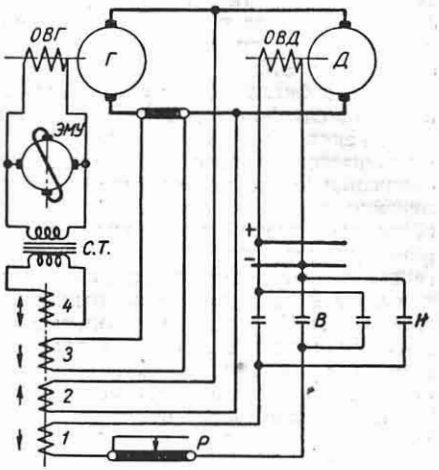
Фиг. 19.

равна нулю. Обмотка *ОВГ* находится под напряжением U_c. При уменьшении скорости двигателя э. д. с. тахогенератора уменьшится, и через *ОУ* потечет ток, который обусловит появление напряжения на ЭМУ. Ток возбуждения генератора возрастет, что вызовет увеличение скорости двигателя. При увеличении скорости двигателя будет иметь место обратная картина.

Рассмотренная схема обладает отрицательной обратной связью по скорости двигателя, преобразованной в напряжение тахогенератора. Отметим также, что в этой схеме на одну обмотку ЭМУ подается два разных напряжения: задающее и напряжение тахогенератора.

Для изменения скорости вращения двигателя *Д* нужно соответственно изменить величину задающего напряжения.

На фиг. 20 представлена схема электромашинного управления двигателем *Д*,



Фиг. 20.

которая обеспечивает стабилизацию скорости без использования тахогенератора. Обмотка *1* является задающей и служит для установления с помощью реостата *Р* требуемой скорости двигателя. Обмотки *2* и *3* осуществляют обратную связь по напряжению и току и являются регулирующими. Скорость двигателя пропорциональна его э. д. с.:

$$E = C_e n = U - IR,$$

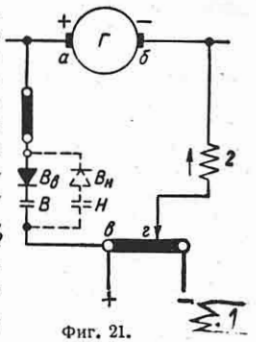
где *I* — ток главной цепи; *R* — ее сопротивление.

Как видно из схемы, н. с. обмотки *2* пропорциональна *U*, а обмотки *3* — току *I*. Так как н. с. этих обмоток направлены встречно, их результирующая н. с. пропорциональна скорости *n*. Обмотка *2*, кроме того, осуществляет форсировку возбуждения генератора при пуске.

ЭМУ с поперечным возбуждением, обладая большим коэффициентом усиления, склонен к колебаниям напряжения. Для успокоения этих колебаний применяется стабилизирующая обмотка *4*, включенная во вторичную цепь стабилизирующего трансформатора *СТ*. Н. с. этой обмотки пропорциональна производной напряжения ЭМУ по времени. При

установившемся режиме ток в обмотке *4* равен нулю. При увеличении напряжения ЭМУ через обмотку *4* протекает ток такого направления, что н. с. этой обмотки уменьшает возбуждение ЭМУ, замедляя процесс нарастания его напряжения. Процесс уменьшения напряжения ЭМУ также будет замедляться действием обмотки *4*. Таким образом, стабилизирующая обмотка является обмоткой связи по первой производной напряжения ЭМУ.

В схеме фиг. 20 при пуске двигателя коэффициент форсировки по мере роста напряжения генератора непрерывно уменьшается, достигая единицы при окончании процесса возбуждения. Применение схемы с отсечкой позволяет сохранять высокий коэффициент форсировки до тех пор, пока возбуждение генератора не достигнет заданной величины. На фиг. 21 в цепь обмотки управления *2* ЭМУ (якорь и остальные обмотки на схеме не показаны) включено встречное напряжение $U_{вг}$, равное падению напряжения на участке *вг* потенциометра, питаемого от постороннего источника постоянного тока. Пока $U_{вв}$ больше $U_{аб}$, ток через обмотку *2* не протекает, так как в цепь ее включен выпрямитель *Вв*. В этом случае э. д. с. ЭМУ и напряжение генератора определяются н. с. задающей обмотки *1*. Когда напряжение генератора $U_{аб}$ сделается больше $U_{вг}$, через обмотку *2* потечет ток в направлении, показанном стрелкой, и э. д. с. ЭМУ резко уменьшится. При реверсивном управлении, в зависимости от требуемого направления вращения должна меняться полярность тока в обмотке *1* и в потенциометре *вг*. Кроме того, добавляется второй выпрямитель, и через блок-контакты включаются контакты контакторов направления, как это показано на фиг. 21 пунктиром.



Фиг. 21.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Блажкин А. Т., Электромашинная автоматика в горном электроприводе, Углетехиздат, 1953.
2. Булгаков В. А., Электрическая аппаратура управления, Энергоиздат, 1947.
3. Ворошилов М. С., Электрические схемы металлорежущих станков, Машгиз, 1948.
4. Жданов Б. В., Монтаж и эксплуатация кранового электрооборудования, Машгиз, 1952.
5. Лошак А. И., Крановое электрооборудование переменного тока, Металлургиздат, 1953.
6. Петров Л. П., Схемы контакторного управления электроприводами, Энергоиздат, 1953.
7. Попов В. К. и Казанцев И. Н., Основы построения схем автоматизированного электропривода, АН СССР, 1939.
8. Сотсков Б. С., Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры, Энергоиздат, 1950.
9. Челюсткин А. Б., Электроавтоматика прокатных станов, Металлургиздат, 1952.

ГЛАВА XVI

ГИДРАВЛИКА

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Удельный вес, плотность. *Средний удельный вес* γ — отношение веса жидкости G к ее объему V:

$$\gamma = \frac{G}{V} \; кГ/м^3.$$

При неравномерном распределении массы жидкости отношение веса ΔG малого объема жидкости к величине этого объема ΔV неодинаково в различных точках. В этом случае *истинный* удельный вес в данной точке определяется выражением

$$\gamma = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta G}{\Delta V}.$$

Для однородной жидкости средний и истинный удельные веса одинаковы.

Удельный объем v — величина, обратная удельному весу:

$$v = \frac{1}{\gamma} \; м^3/кГ.$$

Относительный вес δ — отношение веса жидкости к весу дистиллированной воды при 4° С, взятой в том же объеме (δ — величина безразмерная).

Плотность ρ — отношение массы жидкости m к ее объему V:

$$\rho = \frac{m}{V} \; кГсек^2/м^4.$$

Различают *среднюю* плотность и *истинную* плотность (см. выше аналогичное различие для удельного веса).

Соотношение между удельным весом и плотностью

$$\gamma = \rho g,$$

где g — ускорение силы тяжести в $м/сек^2$.

Удельный вес (плотность) жидкости изменяется с ее температурой и давлением (см. табл. 1 и 2).

Таблица 1

Удельный вес воды при различных температурах [56]

Температура в °С	γ в $кГ/м^3$	Температура в °С	γ в $кГ/м^3$	Температура в °С	γ в $кГ/м^3$
0	999,9	50	988,1	100	958,4
4	1000,0	60	983,2	150	917,2
10	999,7	70	977,8	200	862,8
20	998,2	80	971,8	250	794
30	995,7	90	965,3	300	700
40	992,2				

Таблица 2

Удельный вес ртути при различных температурах [19]

Температура в °С	γ в $кГ/м^3$	Температура в °С	γ в $кГ/м^3$	Температура в °С	γ в $кГ/м^3$
—10	13 620,2	50	13 472,9	120	13 304,4
0	13 595,5	60	13 448,6	150	13 233,0
10	13 570,8	70	13 424,3	200	13 114,8
20	13 546,2	80	13 400,1	250	12 997,5
30	13 521,7	90	13 376	300	12 880,6
40	13 497,3	100	13 351,8	350	12 763,8
				360	12 740,5

Удельный вес ртути можно вычислять по формуле

$$\gamma = \frac{13\,595{,}5}{1 + 0{,}0001815\,t} \; кГ/м^3,$$

где t — температура в °С.

Если известен удельный вес γ_0 любого непарафинистого нефтепродукта при температуре t_0, то удельный вес его γ

Таблица 3

Удельный вес некоторых жидкостей

Жидкость	γ в $кГ/м^3$	Температура в °С	Источник
Морская вода . .	1025	4	[7]
Спирт винный . .	790	20	[25]
„ метиловый	791,3	20	[25]
Бензол	878,8	20	[25]
Эфир этиловый .	713,5	20	[25]
Глицерин	1260	0	[7]
Нефть легкая . .	860—880	20	[24]
„ тяжелая .	920—930	20	[24]
Бензин	725—760	20	[24]
Лигроин	793—800	20	[52]
Керосин	806—831	20	[52]
Масло соляровое	871—889	20	[52]
Мазут	933—998	20	[52]
Масла веретенные	876—912	20	[52]
„ машинные	886—921	20	[52]
Автолы	911—926	20	[52]
Масла компрессорные	891—926	20	[52]
Масла моторные	916—921	20	[52]
Масло трансформаторное . . .	896	20	[52]

при другой температуре t вычисляется по формуле

$$\gamma = \gamma_0 - k\,(t - t_0),$$

где k — коэффициент, зависящий от удельного веса γ_0 нефтепродукта; значения k в зависимости от γ_0 приведены в табл. 4 [15].

Таблица 4

Коэффициенты k для определения γ нефтепродукта при изменении его температуры

γ_0 в $кГ/м^3$	k	γ_0 в $кГ/м^3$	k
700	0,90	850	0,69
750	0,83	900	0,63
800	0,77	950	0,57

Приведенная выше формула вполне точна для температур в интервале от 0 до 50° С.

Если известен удельный вес нефтепродукта при 15° С (γ_{15}), то величину γ при другой температуре можно определить и по формуле Менделеева

$$\gamma = \frac{\gamma_{15}}{1 + \beta\,(t - 15)},$$

где t — температура нефтепродукта в °С; β — коэффициент, зависящий от величины γ_{15}.

Значения коэффициента β в формуле Менделеева [23]

γ_{15} в $кГ/м^3$	700	800	850	900	920
$10^4 \cdot \beta$	8,2	7,7	7,2	6,4	6

Влияние давления на удельный вес капельных жидкостей иллюстрируется табл. 5 для воды и ртути [56].

Уменьшение объема ΔV капельной жидкости при возрастании давления от p_1 до p_2 определяется уравнением

$$\Delta V = \beta \cdot V_0\,(p_1 - p_2),$$

где V_0 — начальный объем жидкости (при давлении p_1); β — средний коэффициент объемного сжатия в интервале давлений $p_1 - p_2$ (обычно в $см^2/кГ$).

Коэффициент β зависит от рода жидкости, ее температуры и давления.

Объемный модуль упругости жидкости E — величина, обратная β:

$$E = \frac{1}{\beta}\ кГ/см^2.$$

Значения E для воды см. в табл. 6.

Вязкость — свойство жидкости сопротивляться относительному движению (сдвигу) ее частиц, обусловливающее

Таблица 5

Изменение удельного веса воды и ртути от давления

Давление p в *ати*	Вода				Ртуть			
	Относительный объем		Удельный вес γ в $кГ/м^3$		Относительный объем		Удельный вес γ в $кГ/м^3$	
	0°	40°	0°	40°	0°	20°	0°	20°
0	1,000	1,0076	999,9	992,2	1,000	1,00362	13 596	13 546
500	0,9769	0,9867	1024	1014	—	—	—	—
1 000	0,9566	0,9689	1046	1032	0,99441	0,99959	13 660	13 600
2 000	0,9223	0,9386	1084	1066	0,99237	0,99194	13 690	13 700
4 000	0,8739	0,8931	1146	1120	0,98517	0,98833	13 800	13 750
8 000	—	0,8330	—	1201	—	0,97534	—	13 930
12 000	—	0,7931	—	1261	—	0,96476	—	14 080

Таблица 6

Значения модуля упругости $E \cdot 10^{-3}$ для воды в $кГ/см^2$ [37]

Температура в °С	Давление p в $кГ/см^2$				
	5	10	20	40	80
0	18,9	19	19,2	19,5	19,8
10	19,5	19,7	20,1	20,5	21,2
20	19,8	20,2	20,6	21,2	22,17

появление силы внутреннего трения P между слоями жидкости, если последние имеют различные скорости движения.

По закону Ньютона, экспериментально подтвержденному Н. П. Петровым, сила P при параллельном прямолинейном движении слоев жидкости определяется формулой

$$P = \mu \frac{dv}{dn} S,$$

где S — площадь соприкасающихся слоев жидкости; μ — динамический коэффициент вязкости, зависящий от рода жидкости, ее температуры и давления; является количественной мерой вязкости жидкости; $\frac{dv}{dn}$ — градиент скорости, выражающий интенсивность изменения скорости v слоев жидкости в направлении n, нормальном движению жидкости.

Кинематический коэффициент вязкости ν связан с μ соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

где ρ — плотность жидкости.

Размерность μ в системе MKS — $кГ \cdot сек/м^2$, в системе CGS — $дина \cdot сек/см^2$. Единица μ в системе CGS — *пуаз*.

$$Пуаз = 1 \frac{дн \cdot сек}{см^2} =$$

$$= 100 \text{ } сантипуаз = 1000 \text{ } миллипуаз.$$

Размерность ν в системе MKS — $м^2/сек$, в системе CGS — $см^2/сек$.

Единица ν в системе CGS — *стокс*.

Стокс (*ст*) $= 1$ $см^2/сек = 100$ *сантистокс* (*сст*).

Соотношения между единицами вязкости в обеих системах:

$$1 \text{ } кГ \cdot сек/м^2 = 98{,}1 \text{ } пуаза;$$

$$1 \text{ } пуаз = 0{,}0102 \text{ } кГ \cdot сек/м^2;$$

$$1 \text{ } м^2/сек = 10^4 \text{ } ст.$$

Соотношения между величинами вязкости:

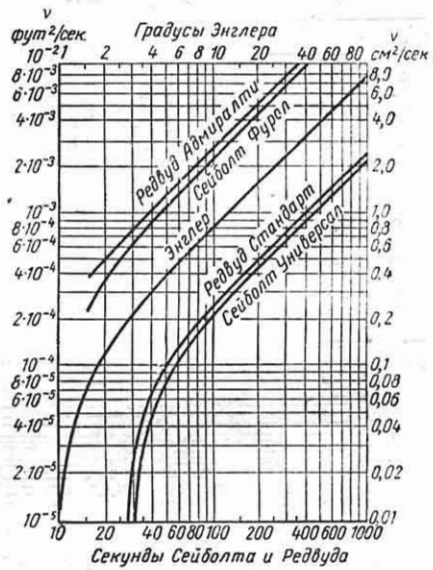
$$\mu \text{ в } кГ \cdot сек/м^2 = \frac{1}{98{,}1} \mu \text{ в } пуазах =$$

$$= 0{,}0102 \mu \text{ в } пуазах;$$

$$\nu \text{ в } м^2/сек = 10^{-4} \nu \text{ в } ст = 0{,}1 \frac{\mu \text{ в } пуазах}{\gamma \text{ в } кГ/м^3}.$$

Вязкость жидкостей определяется вискозиметрами, дающими в зависимости от их типа или кинематический коэффициент вязкости, или вязкость в условных единицах.

График по фиг. 1 позволяет находить соотношения между величинами



Фиг. 1. Соотношения между величинами вязкости в различных единицах.

вязкости в различных условных единицах (градусы Энглера, секунды Сейболта-Универсал, Сейболта-Фурол, Редвуда-Адмиралти, Редвуда-Стандарт), а также переводить эти величины в единицы кинематического коэффициента вязкости ν в $см^2/сек$ или в $фут^2/сек$.

Связь между ν и градусами Энглера (°E) определяется опытной формулой

$$10^6 \nu \text{ } м^2/сек = E \cdot 7{,}6 \left(1 - \frac{1}{°E^3}\right).$$

С возрастанием температуры вязкость капельных жидкостей уменьшается (табл 7 и 8), а вязкость жидкостей газообразных увеличивается.

Таблица 7

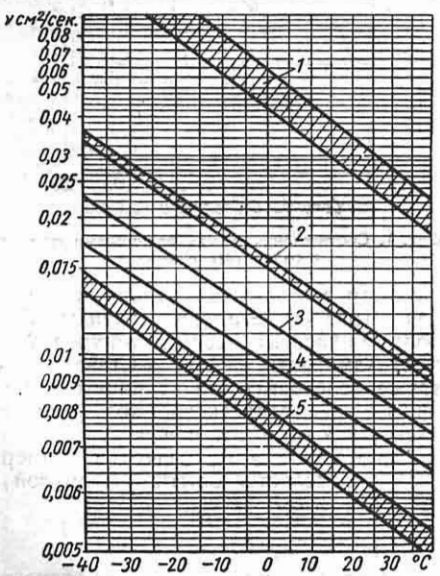
Коэффициенты вязкости μ и ν для воды [53]

Температура в °С	μ в миллипуазах	ν в *сст*	Температура в °С	μ в миллипуазах	ν в *сст*
0	17,92	1,792	60	4,69	0,477
10	13,08	1,308	70	4,06	0,415
20	10,05	1,007	80	3,57	0,367
30	8,01	0,804	90	3,17	0,328
40	6,56	0,661	100	2,84	0,296
50	5,49	0,556			

Таблица 8

Динамический коэффициент вязкости μ капельных жидкостей в миллипуазах при различной температуре

Температура в °С	Вязкость μ в миллипуазах					
	Бензол [25]	Метиловый спирт [25]	Винный спирт [25]	Глицерин [13]	Касторовое масло [13]	Ртуть [13]
0	9,0	8,08	—	46 000	—	16
10	7,57	6,9	14,49	—	—	—
20	6,47	5,93	11,92	8 500	10 200	—
30	5,61	5,15	9,91	—	4 500	—
40	4,92	4,49	8,28	—	2 240	—
50	4,39	3,95	6,97	—	—	—
60	3,89	3,49	6,07	—	—	—
70	3,50	—	5,05	—	—	—

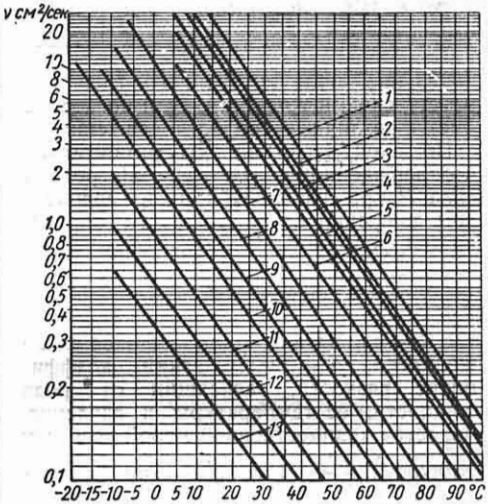


Фиг. 2. Вязкость советских нефтепродуктов: *1* — керосин; *2* — лигроин бакинский; *3* — лигроин грозненский; *4* — крекинг-бензин бакинский; *5* — бензин авиационный грозненский.

Вязкость советских нефтепродуктов можно определить по номограммам фиг. 2 и 3 [38], составленным на основании уравнения

$$\lg \lg (\nu + 0{,}8) = A + B \lg (273 + t^\circ),$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости в *сст* при температуре t° С;



Фиг. 3. Вязкость советских масел: *1* — автол 18 селективной очистки; *2* — летнее для быстроходных дизелей; *3* — цилиндровое; *4* — автол 10 селективной очистки; *5* — моторное Т; *6* — моторное М; *7* — машинное Л; *8* — турбинное Л; *9* — сепараторное Т; *10* — веретенное 3; *11* — трансформаторное; *12* — соляровое П; *13* — велосит.

A и B — постоянные для каждого вида нефтепродуктов, определяемые из опыта для трех различных температур, обычно $t = 0$, 50 и 100° С, если $\nu < 125$ *сст* при $t = 50^\circ$ С. Для более вязких нефтепродуктов ν определяется при $t = 20$, 50 и 100° С. С помощью приведенного выше уравнения вязкость нефтепродукта может вычисляться в интервале температур от −25 до +175° С [51].

В табл. 9 приведены значения ν для советских нефтепродуктов при характерных температурах [54].

Влияние давления на вязкость жидкостей. С увеличением давления вязкость масел и почти всех других жидкостей возрастает. Вязкость минеральных масел *1* при увеличении давления возрастает быстрее, чем вязкость масел органических *2* [35] (фиг. 4). Степень изменения вязкости с измене-

Таблица 9

Значения ν для советских нефтепродуктов

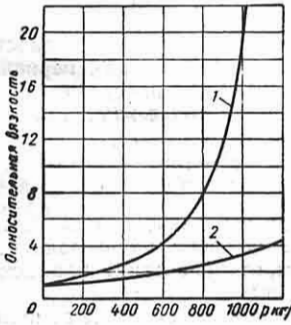
Название нефтепродукта	ν в *сст* при температуре в °С		
	20	50	100
Масло веретенное АУ (ГОСТ 1642-50)	⩽ 49	12—14	—
„ трансформаторное (ГОСТ 982-53)	⩽ 30,0	⩽ 9,6	—
„ компрессорное М (ГОСТ 1861-54)	—	—	8,5—14
„ „ Т (ГОСТ 1861-54)	—	—	15—21
„ турбинное 22 (турбинное Л) (ГОСТ 32-53)	—	20—23	—
„ „ 30 (турбинное УТ) (ГОСТ 32-53)	—	28—32	—
„ „ 46 (турбинное Т) (ГОСТ 32-53)	—	44—48	—
„ дизельное (ГОСТ 1600-46)	—	⩽ 77	⩾ 10,5
„ авиационное МС-14 (ГОСТ 1013-49)	—	⩽ 92	⩾ 14
„ цилиндровое 11 (ГОСТ 1841-51)	—	—	9—13
„ индустриальное 12 (ГОСТ 1707-51)	—	10—14	—
„ соляровое (ГОСТ 1666-51)	—	5—9	—
Дизельное топливо ДА (ГОСТ 4749-49)	2,5—4,0	—	—

Таблица 10

Относительная величина кинематической вязкости по сравнению с вязкостью при атмосферном давлении

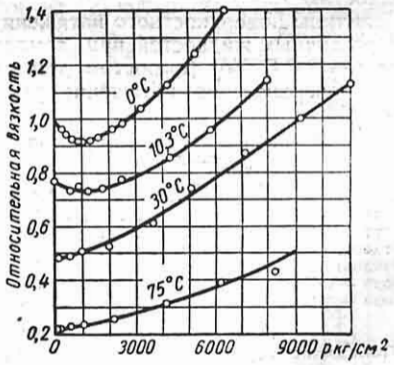
Масло	$p = 1000$ *кГ/см²*		$p = 1800$ *кГ/см²*	
	$t = 54°$ С	$t = 100°$ С	$t = 54°$ С	$t = 100°$ С
Минеральное I	7	3	25	13
„ II	17	6	108	29
Касторовое	—	2	—	5

нием давления зависит и от температуры жидкости [50] (см. табл. 10): чем ниже температура, тем интенсивнее возрастает вязкость по мере повышения давления.



Фиг. 4. Влияние давления на вязкость масел.

Как следует из графика фиг. 5, при температуре $t < 30°$ С вязкость воды с повышением давления сначала несколько уменьшается, а затем при давлениях $p > 1000$ *кГ/см²* начинает возрастать. При $t > 30°$ С вязкость воды монотонно возрастает по мере увеличения давления [4].



Фиг. 5. Влияние давления на вязкость воды.

Капиллярность и поверхностное натяжение. Уровень жидкости в капилляре (обычно — трубка малого сечения) отличается от уровня жидкости в большом сосуде, с которым сообщается капилляр.

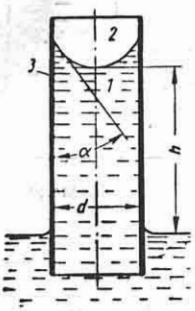
При вогнутом мениске уровень жидкости в капилляре на величину h выше

а при выпуклом мениске — ниже уровня жидкости в сообщающемся с капилляром сосуде.

Высота h в капилляре круглого сечения определяется формулой

$$h = \frac{4\sigma \cos \alpha}{d(\gamma_1 - \gamma_2)},$$

где σ — поверхностное натяжение (удельная поверхностная энергия); d — диаметр капилляра; γ_1 и α_2 — удельные веса соприкасающихся жидкостей (например, воды и воздуха); γ — краевой угол (фиг. 6).



Фиг. 6. Схема капилляра.

В общем случае этот угол определяется из формулы

$$\cos \alpha = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{3,1}}{\sigma_{1,2}},$$

где $\sigma_{1,2}$ — поверхностное натяжение на границе между жидкостью *1* и жидкостью (воздухом) *2*; $\sigma_{2,3}$ — поверхностное натяжение на границе между жидкостью (воздухом) *2* и стенкой *3*; $\sigma_{3,1}$ — поверхностное натяжение на границе между стенкой *3* и жидкостью *1*.

Величины поверхностного натяжения σ для различных жидкостей при температуре $t = 20°$ С [55] (с ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается):

Поверхностное натяжение для различных сред

Граничащие среды	σ в *дн/см*
Вода — воздух	72,75
Ртуть — воздух	460
Этиловый спирт — воздух	22,0
Этиловый эфир — воздух	16,5
Вода — бензол	33,0
Вода — этиловый спирт	0

Таблица 11

Поверхностное натяжение σ для среды вода-воздух [55]

Температура в °С	σ в *дн/см*	Температура в °С	σ в *дн/см*
0	75,64	60	66,18
10	74,22	70	64,42
20	72,75	80	62,61
30	71,18	90	60,75
40	69,56	100	58,85
50	67,91		

Высота h подъема жидкости в стеклянном капилляре (для ртути — опускание) определяется практически формулой

$$h = \frac{A}{d} \text{ мм},$$

где d — диаметр капилляра в *мм*; A — постоянная для данной жидкости.

Значения постоянной A для стеклянных капилляров

Жидкость	A
Вода	30
Ртуть	—10
Спирт	10
Толуол	13

Высоту подъема жидкости между параллельными стеклянными пластинами можно определять по формуле

$$h = \frac{A}{2a} \text{ мм},$$

где a — расстояние в *мм* между пластинами.

ДАВЛЕНИЕ В ЖИДКОСТИ, ЕГО ЕДИНИЦЫ

Среднее давление p_{cp} в жидкости на площадке ΔF определяется отношением

$$p_{cp} = \frac{\Delta P}{\Delta F},$$

где ΔP — сила давления жидкости на площадку, направленная перпендикулярно к ее плоскости.

Давление p в точке жидкости

$$p = \lim_{\Delta F \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta F}.$$

Величина p в данной точке жидкости одинакова по всем направлениям, т. е. не зависит от ориентации площадки ΔF в пространстве.

Давление p в любой точке покоящейся жидкости

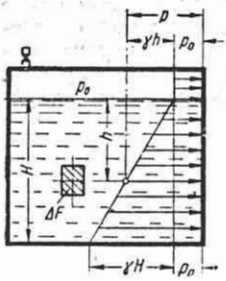
$$p = p_0 + \gamma h,$$

где h — расстояние по вертикали до расположенной выше исходной точки жидкости с известным давлением p_0; γ — удельный вес жидкости.

Если исходная точка лежит на свободной поверхности жидкости, то p_0

есть внешнее давление (фиг. 7). Следовательно, внешнее давление передается без изменения во все точки жидкости (закон Паскаля).

На этом законе основана работа всех гидравлических машин объемного типа: поршневых насосов, гидравлических прессов и домкратов, гидроцилиндров и т. д.



Фиг. 7. Распределение давления в покоющейся жидкости.

Различают давление абсолютное p_a и избыточное p_u; за нуль отсчета для последнего принимается атмосферное давление p_{am}. Давления избыточное и абсолютное связаны соотношением

$$p_u = p_a - p_{am}.$$

При $p_a > p_{am}$ величина $p_u > 0$; в этом случае p_u называется также манометрическим давлением.

Если $p_a < p_{am}$, то $p_u < 0$, и, взятое с обратным знаком, называется вакуумом или вакуумметрическим давлением $p_в$:

$$p_в = p_{am} - p_a.$$

Величину давления можно выражать высотой h столба жидкости:

$$h = \frac{p}{\gamma},$$

где γ — удельный вес жидкости.

За единицу давления в системе МКS принимают 1 *кГ/см²*, что соответствует 10 000 *кГ/м²*, либо также давлению у основания столба воды высотой 10 *м* (при 4°С) или давлению столба ртути высотой 735,5 *мм* (при 0° С).

Среднее атмосферное давление на уровне моря соответствует давлению столба ртути высотой 760 *мм* или столба воды высотой 10,33 *м*, т. е. равно 1,033 *кГ/см²*.

В технической системе английских мер единицей давления является 1 фунт на квадратный дюйм.

1 фунт/кв. дюйм = 0,0703 *кГ/см²*

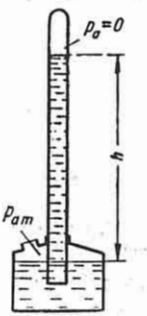
(1 *кГ/см²* = 14,223 фунт/кв. дюйм).

В системе CGS единицей давления является бар (см. т. I, стр. 543).

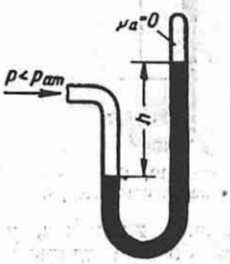
ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

(см. также гл. I, стр. 10)

Барометры — приборы для измерения величины атмосферного давления. В практике применяются барометры пружинные (анероиды), самопишущие (барографы), ртутные. Ртутные барометры подразделяются на чашечные (фиг. 8) и сифонные, в том числе укороченные (фиг. 9), используемые для измерения абсолютных давлений, меньших атмосферного. Стеклянные трубки ртутных барометров должны иметь диаметр $d \geqslant 10$ *мм*, чтобы явления капиллярности не сказались на показаниях прибора (это условие должно выполняться и в пьезометрах — см. ниже).

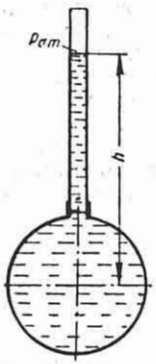


Фиг. 8. Схема чашечного барометра.

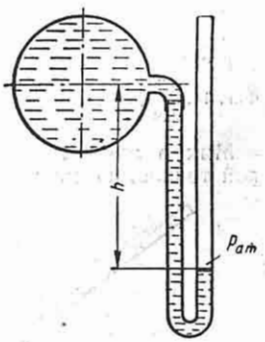


Фиг. 9. Схема сифонного укороченного барометра.

Пьезометры (фиг. 10 и 11) позволяют измерять избыточное давление или вакуум в единицах высоты столба той жидкости, давление которой опреде-



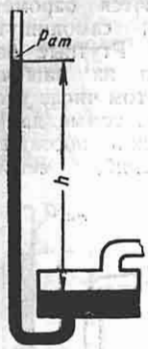
Фиг. 10. Определение избыточного давления по пьезометру.



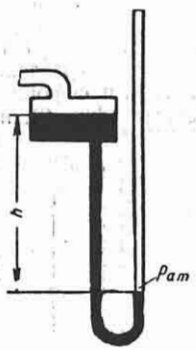
Фиг. 11. Определение вакуума по пьезометру.

ляется; применяются для измерения сравнительно небольших давлений или вакуумов, обычно при $h \leqslant 2$ *м*.

Жидкостные манометры и вакуумметры измеряют избыточное давление или вакуум в единицах высоты h столба

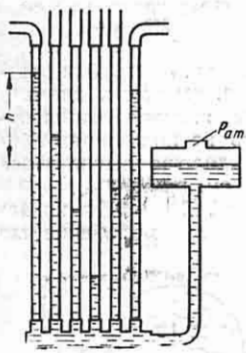


Фиг. 12. Схема чашечного манометра.



Фиг. 13. Схема чашечного вакуумметра.

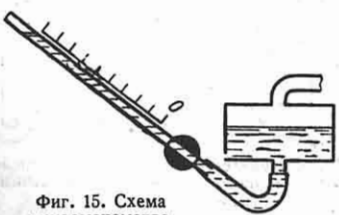
рабочей жидкости, удельный вес которой больше удельного веса жидкости, передающей давление к прибору. Применяются (обычно при $h \leqslant 1,5$ *м*) U-образные и чашечные манометры (фиг. 12) и вакуумметры (фиг. 13).



Фиг. 14. Схема батарейного манометра.

Батарейные манометры (фиг. 14) употребляются для одновременного измерения давления в различных местах трубопровода, обтекаемого потоком тела, и т. д.

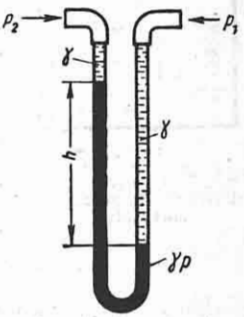
Микроманометры измеряют с высокой точностью малые избыточные давления или вакуум — до 500 *кГ/м²*, имеют или вертикальную шкалу с нониусом и



Фиг. 15. Схема микроманометра.

оптическим устройством, или наклонную трубку (фиг. 15) постоянного или переменного наклона.

Пружинные манометры и вакуумметры имеют упругий (пружинящий) элемент, который разобщает с атмосферой среду, передающую измеряемое давление, и своей деформацией определяет величину давления. Упругим элементом может быть трубчатая пружина, мембрана, сильфон. Манометры с трубчатой пружиной применяются в широком диапазоне давлений до 10 000 *кГ/см²*. Пружинные манометры всех типов необходимо периодически проверять.

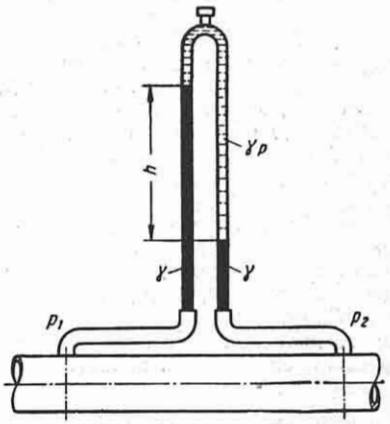


Фиг. 16. Схема дифманометра с U-образной трубкой.

Дифференциальные манометры употребляются для измерения разности давлений Δp в двух сечениях потока в трубопроводе, обычно — в расходомерных устройствах. Для дифманометра с U-образной трубкой (фиг. 16)

$$\Delta p = h\,(\gamma_p - \gamma),$$

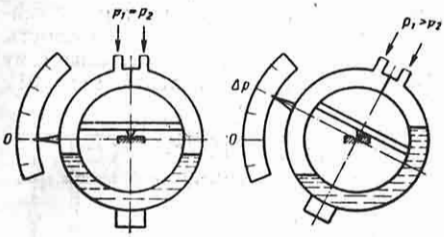
где γ_p — удельный вес рабочей жидкости; γ — удельный вес жидкости, передающей



Фиг. 17. Схема дифманометра с перевернутой U-образной трубкой.

давление. Для дифманометра с перевернутой U-образной трубкой (фиг. 17)

$\Delta p = h(\gamma - \gamma_p)$. В кольцевых весах (фиг. 18) разность давлений перемещает рабочую жидкость внутри прибора, чем и вызывает поворот кольца на определенный угол. При заполнении кольцевых весов ртутью ими можно измерять разности давлений $\Delta p \leqslant 2500$ *кГ/м²*.



Фиг. 18. Схема кольцевых весов.

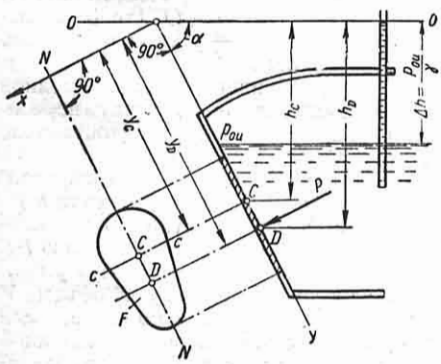
Манометры электрические и других типов — см. специальную литературу [8], [29].

СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ ПОКОЯЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ НА СТЕНКИ

Сила давления на плоскую стенку. Если плоская стенка подвергается одностороннему давлению жидкости (на несмоченной стороне стенки — атмосферное давление), то полная сила давления P, воспринимаемая стенкой, и нормальная к ней (фиг. 19),

$$P = p_c F = \gamma h_c F, \qquad (1)$$

где F — смоченная площадь стенки; p_c — избыточное давление в центре тяжести площади F; h_c — расстояние по вертикали от центра тяжести площади F до пьезометрической плоскости или плоскости напора $O-O$; при избыточном давлении p_{ou} на свободной поверхности эта плоскость проходит над свободной поверхностью на расстоянии $\Delta h = \frac{p_{ou}}{\gamma}$ (при вакууме — под свободной поверхностью).



Фиг. 19. Определение силы давления на плоскую стенку.

Центр давления стенки — точка пересечения линии действия силы P с плоскостью стенки. Положение центра давления (точка D) определяется формулой

$$y_D = y_C + \frac{J_C}{F y_C}, \qquad (2)$$

где y_D и y_C — расстояния центра давления D и центра тяжести C стенки до линии пересечения плоскости стенки с пьезометрической плоскостью (ось x на фиг. 19); J_C — момент инерции площади стенки относительно горизонтальной оси $c-c$, проходящей через ее центр тяжести.

Если стенка не имеет оси симметрии NN, перпендикулярной к горизонтальной оси x, то для определения центра давления помимо величины y_D нужно знать и горизонтальную координату x_D:

$$x_D = \frac{J_{xy}}{F y_C},$$

где J_{xy} — центробежный момент инерции площади стенки относительно осей x, y, лежащих в ее плоскости и проходящих через центр тяжести стенки.

Формулу (2) можно привести к виду

$$h_D = h_C + \frac{J_C}{F h_C} \sin^2 \alpha,$$

где h_D и h_C — вертикальные расстояния от пьезометрической плоскости до центра давления D и центра тяжести C; α — угол наклона стенки к горизонту.

Для вертикальной стенки ($\alpha = 90°$)

$$h_D = h_C + \frac{J_C}{F h_C}. \qquad (3)$$

Для горизонтальной стенки ($\alpha = 0$) $h_D = h_C$ (центр давления и центр тяжести совпадают).

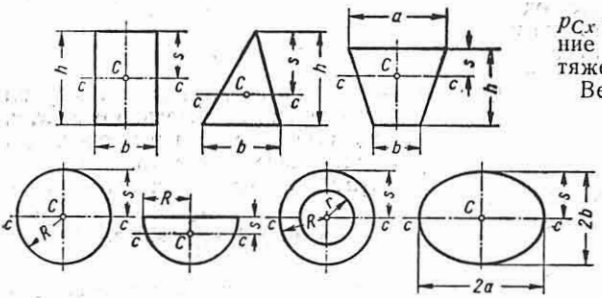
Если $p_{ou} = 0$, пьезометрическая плоскость совпадает со свободной поверхностью (сила давления на стенку создается только жидкостью). Если на несмоченной стороне стенки давление газа не равно атмосферному, положение плоскости напора $O-O$ (отрезок Δh)

Таблица 12

Название фигуры	J_C	s
Прямоугольник	$\frac{1}{12} bh^3$	$\frac{1}{2} h$
Треугольник	$\frac{1}{36} bh^3$	$\frac{2}{3} h$
Трапеция равнобедренная	$\frac{1}{36} h^3 \frac{a^2+4ab+b^2}{a+b}$	$\frac{1}{3} h \frac{a+2b}{a+b}$
Круг	$\frac{1}{4} \pi R^4$	R
Полукруг	$\frac{1}{8} \pi R^4$	$\frac{4}{3\pi} R$
Кольцо	$\frac{1}{4} \pi (R^4 - r^4)$	R
Эллипс	$\frac{1}{4} \pi ab^3$	b

определяется избытком давления на свободной поверхности по отношению к этому наружному давлению.

В табл. 12 приведены величины момента инерции J_C площадей плоских фигур и координаты s центра тяжести их (фиг. 20).



Фиг. 20.

Сила давления жидкости на криволинейную стенку. Для криволинейной стенки полная сила давления P находится как геометрическая сумма ее составляющих P_x, P_y и P_z по осям координат (P_x и P_y — горизонтальные составляющие по двум взаимно перпендикулярным направлениям).

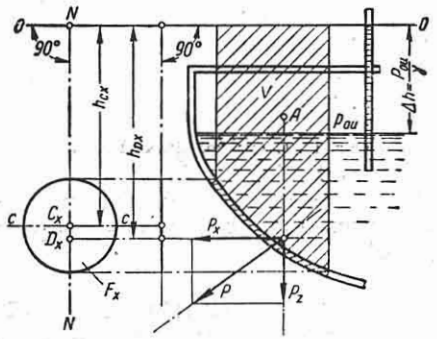
Если стенка имеет вертикальную плоскость симметрии или является частью цилиндрической поверхности с горизонтальной образующей, то полная сила давления P на такую стенку имеет лишь две составляющие — горизонтальную P_x и вертикальную P_z, в плоскости симметрии или (для цилиндрической стенки) в плоскости, нормальной образующей:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}.$$

Горизонтальная составляющая

$$P_x = F_x p_{Cx}, \qquad (4)$$

где F_x — площадь проекции криволинейной стенки на вертикальную плоскость, перпендикулярную к рассматриваемому горизонтальному направлению (фиг. 21);



Фиг. 21. Определение составляющих силы давления на криволинейную стенку.

$p_{Cx} = \gamma h_{Cx}$ — избыточное давление жидкости на уровне центра тяжести этой проекции.

Вертикальная составляющая

$$P_z = V\gamma, \qquad (5)$$

где V — объем, ограниченный стенкой, вертикальным проектирующим цилиндром и пьезометрической плоскостью $O-O$ (тело давления); γ — удельный вес жидкости.

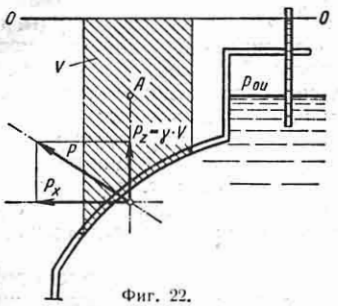
Линия действия полной силы P проходит через точку пересечения линий действия горизонтальной и вертикальной составляющих.

Положение линии действия горизонтальной составляющей (координата h_{Dx}) определяется по формуле (3) для плоской вертикальной стенки площадью F_x.

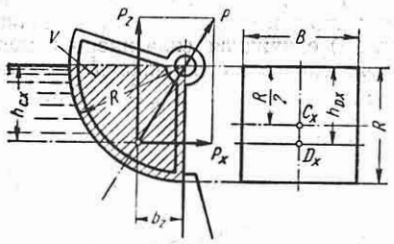
Вертикальная составляющая P_z проходит через центр тяжести A объема V и направлена вертикально вниз, если тело давления построено со смоченной стороны стенки (вверх, если тело давления построено с несмоченной стороны стенки, фиг. 22).

В качестве примера определим составляющие P_x и P_z и полную силу P.

действующую со стороны воды на поверхность сегментного щита радиуса R и шириной B (фиг. 23):



Фиг. 22.



Фиг. 23.

$$P_x = BR \times \frac{1}{2} R\gamma = \frac{1}{2} BR^2\gamma;$$

$$h_{D_X} = \frac{1}{2} R + \frac{1}{12} \frac{BR^3 \cdot 2}{BR \cdot R} = \frac{2}{3} R;$$

$$P_z = V\gamma = \frac{1}{4} \pi BR^2\gamma; \; b_z = \frac{4}{3} \cdot \frac{R}{\pi};$$

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} =$$

$$= \frac{1}{2} BR^2\gamma \sqrt{1 + \frac{1}{4} \pi^2} = 0{,}931 BR^2\gamma.$$

ЗАКОН АРХИМЕДА. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА В ЖИДКОСТИ

Результирующая сила давления жидкости на поверхность погруженного в нее тела равна весу жидкости в объеме погруженной части тела и направлена вверх по вертикали (закон Архимеда):

$$P = V\gamma,$$

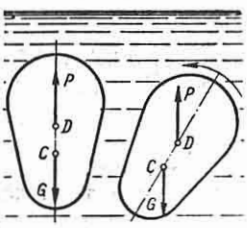
где V — объем жидкости, вытесненной телом (объемное водоизмещение); γ — удельный вес жидкости.

Линия действия выталкивающей силы проходит через центр тяжести вытесненного объема жидкости, называемый центром водоизмещения (фиг. 24, точка D).

В общем случае центр водоизмещения не совпадает с центром тяжести тела (точкой C).

Точки C и D при подводном плавании тела совпадают, если погруженное тело имеет массу, равномерно распределенную по всему объему.

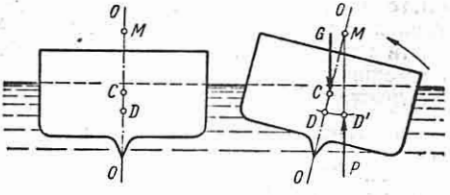
Равновесие тела, погруженного полностью или частично в жидкость (имеющее место при равенстве P и веса тела G), может быть устойчивым и неустойчивым. При подводном плавании устойчивое равновесие тела обеспечивается расположением его центра тяжести C ниже центра водоизмещения D (фиг. 24).



Фиг. 24. Условие устойчивого равновесия тела при подводном плавании.

Надводное плавание устойчиво, если метацентр M (фиг. 25) находится выше центра тяжести C. Метацентр — точка пересечения линии действия подъемной силы P (действующей на выведенное из равновесия плавающее тело) и оси симметрии тела $O-O$, занимающей вертикальное положение при равновесии тела (ось плавания).

Плоскость плавания — плоскость, совпадающая со свободной поверхностью жидкости. Сечение тела плоскостью плавания ограничено замкнутой линией — контуром плавания.



Фиг. 25. Надводное плавание.

Остойчивость — способность плавающего тела сохранять устойчивое равновесие при кренах. Мерой остойчивости служит метацентрическая высота MC

(фиг. 25) — расстояние от центра тяжести тела C до метацентра M. Чем больше величина MC, тем выше остойчивость.

При малых кренах (до 15°) метацентр M сохраняет постоянное положение на оси плавания, т. е. центр водоизмещения перемещается по радиусу $r = MD$ (фиг. 25), называемому метацентрическим радиусом;

$$r = \frac{J}{V},$$

где J — момент инерции площади, ограниченной контуром плавания относительно той ее оси симметрии, вокруг которой происходит крен; V — объемное водоизмещение.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОКОЙ ЖИДКОСТИ

Относительный покой жидкости в движущемся сосуде имеет место, когда жидкость перемещается вместе с ним как твердое тело, так, что ее частицы не смещаются относительно сосуда. Закон распределения давления находится путем интегрирования дифференциального уравнения равновесия

$$dp = \rho (X \cdot dx + Y \cdot dy + Z \cdot dz), \quad (6)$$

где ρ — плотность жидкости; x, y, z — координаты точек жидкости в системе отсчета, жестко связанной с движущимся сосудом; X, Y, Z — проекции вектора единичной массовой силы $\bar{q}$ на координатные оси указанной системы отсчета.

При относительном покое единичная массовая сила является суммой единичной силы тяжести $\bar{g}$ и единичной силы инерции переносного движения $\bar{j}$, т. е. $\bar{q} = \bar{g} + \bar{j}$.

Дифференциальное уравнение поверхностей уровня (поверхностей равного давления), в частности — свободной поверхности жидкости и границы раздела двух несмешивающихся жидкостей различной плотности:

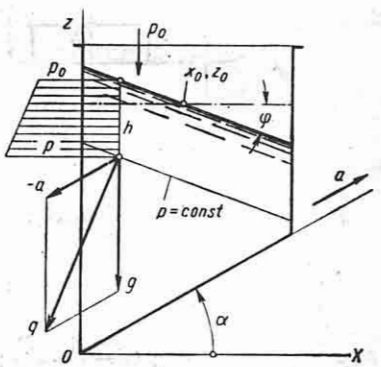
$$X \cdot dx + Y \cdot dy + Z \cdot dz = 0. \quad (7)$$

Единичная массовая сила в любой точке жидкости направлена по нормали к поверхности уровня, проходящей через данную точку.

Относительный покой возможен при таком переносном движении, для которого форма и положение свободной поверхности жидкости (или границы ее раздела с другой жидкостью) не зависят от времени, что всегда имеет место при стационарности поля массовой силы q. При отсутствии указанных граничных поверхностей (замкнутые сосуды, целиком заполненные однородной жидкостью) относительный покой может в некоторых случаях существовать и в нестационарном поле массовой силы.

При равномерном прямолинейном движении сосуда силы инерции переносного движения отсутствуют, и условия относительного равновесия совпадают с условиями равновесия жидкости в неподвижном сосуде.

Прямолинейное равноускоренное движение сосуда. При движении сосуда с постоянным ускорением $\bar{a}$ в плоскости xOz под углом α к горизонту (фиг. 26) единичная сила инерции переносного движения одинакова для всех точек жидкости и равна $\bar{j} = -\bar{a}$.



Фиг. 26. Относительный покой при поступательном равноускоренном движении сосуда.

Распределение давления в дифференциальной форме

$$dp = -\rho a \cos\alpha \, dx - \rho (g + a \sin\alpha) \, dz.$$

Поверхности уровня — параллельные плоскости, нормальные к плоскости движения и наклоненные к горизонтали под углом φ, для которого

$$\operatorname{tg}\varphi = -\frac{a\cos\alpha}{g + a\sin\alpha}.$$

Распределение давления в жидкости:

$$p = p_0 + \rho a \cos\alpha (x_0 - x) + \rho (g + a \sin\alpha)(z_0 - z), \quad (8)$$

где x_0, z_0 — координаты произвольной фиксированной точки свободной поверх-

ности, определяемые заданием объема жидкости, находящейся в сосуде; p_0 — давление на свободной поверхности.

Изменение давления по вертикали (h — глубина точки под свободной поверхностью)

$$p = p_0 + \rho (g + a \sin \alpha) h.$$

При вертикальном движении сосуда ($\alpha = 90°$ — ускорение направлено вверх и $\alpha = 270°$ — ускорение направлено вниз) $\varphi = 0$, и свободная поверхность горизонтальна. Распределение давления по глубине:

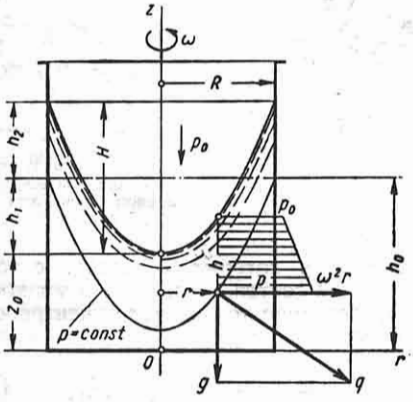
$$p = p_0 + \rho (g \pm a) h. \qquad (9)$$

При горизонтальном движении сосуда ($\alpha = 0$) угол наклона свободной поверхности к горизонту $\operatorname{tg} \varphi = -\frac{a}{g}$, и распределение давления по глубине

$$p = p_0 + \gamma h,$$

т. е. такое же, как в неподвижном сосуде.

Равномерное вращение сосуда вокруг вертикальной оси (фиг. 27). Вследствие круговой симметрии можно ограничиться рассмотрением условий относительного покоя в любой осевой



Фиг. 27. Относительный покой при равномерном вращении сосуда вокруг вертикальной оси.

плоскости rOz. Единичная сила инерции переносного движения (центробежная) $j = \omega^2 r$ (ω — угловая скорость вращения, r — радиус вращения точки). Распределение давления в дифференциальной форме

$$dp = \omega^2 r \cdot dr - g \cdot dz.$$

Уравнение свободной поверхности ($p = p_0$)

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g}$$

и любой поверхности уровня ($p = \text{const}$):

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} - h;$$

$$h = \frac{p - p_0}{\gamma},$$

где z_0 — координата точки пересечения свободной поверхности с осью вращения.

Поверхности уровня — параболоиды вращения с одинаковым параметром $\frac{g}{\omega^2}$, общая ось которых лежит на оси вращения сосуда, а вершины смещены вдоль этой оси.

Высота параболоида свободной поверхности (R — радиус сосуда)

$$H = \frac{\omega^2 R^2}{2g}.$$

Координата z_0 его вершины определяется заданием объема жидкости в сосуде. Если начальный уровень в неподвижном сосуде h_0, то из условия неизменности объема жидкости (учитывая, что объем параболоида вращения $V_n = \frac{1}{2} \pi R^2 H$)

$$z_0 = h_0 - \frac{\omega^2 R^2}{4g},$$

откуда

$$h_1 = h_2 = \frac{H}{2}.$$

Распределение давления в жидкости:

$$p = p_0 + \gamma \frac{\omega^2 r^2}{2g} + \gamma (z_0 - z). \qquad (10)$$

Изменение давления по вертикали (h — глубина точки под свободной поверхностью):

$$p = p_0 + \gamma h, \qquad (11)$$

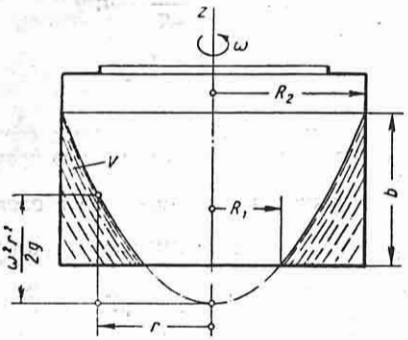
т. е. такое же, как в неподвижном сосуде.

Если свободная поверхность пересекает дно сосуда (фиг. 28), ее положение

при заданном объеме жидкости V определяется из соотношений

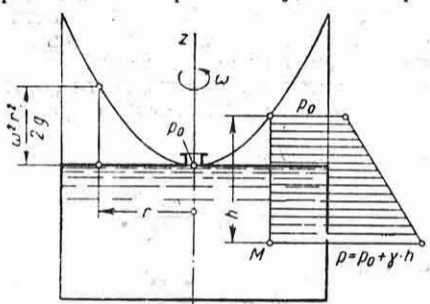
$$V = \pi\left(R_2^2 - R_1^2\right)\frac{b}{2} = \frac{\pi g}{\omega^2}b^2,$$

где b — высота кольца жидкости; R_2 — радиус сосуда; R_1 — радиус окружности пересечения свободной поверхности с дном.



Фиг. 28.

В случае целиком заполненного закрытого сосуда давление в каждой точке M жидкости определяется глубиной ее расположения h под поверхностью уровня, проведенной через точку, в которой



Фиг. 29.

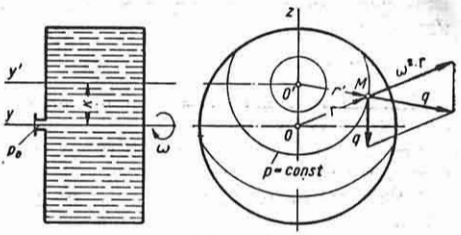
фиксировано известное давление p_0 (фиг. 29).

Равномерное вращение сосуда вокруг горизонтальной оси (фиг. 30). Распределение давления несимметрично относительно оси вращения сосуда из-за влияния силы тяжести. Давление в точке M, радиус вращения которой r и вертикальная координата z, определяются суммарным полем центробежных сил инерции и силы веса:

$$p = p_0 + \gamma\frac{\omega^2 r^2}{2g} - \gamma z, \qquad (12)$$

где p_0 — давление на оси вращения сосуда (принятой за начало отсчета z).

Поверхности уровня представляют собой концентричные цилиндры с радиу-

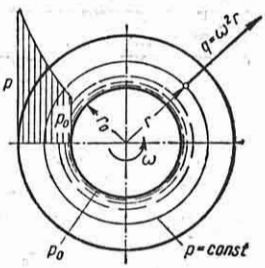


Фиг. 30.

сами r' и осью y', расположенной над осью вращения на расстоянии $k = \frac{g}{\omega^2}$.

При целиком заполненном сосуде давление в точках жидкости периодически меняется за каждый оборот на величину $2\gamma r$. В частично заполненном сосуде относительное равновесие невозможно из-за перемещений свободной поверхности жидкости.

Если отношение сил инерции к силам веса велико $\left(\frac{\omega^2 r}{g} \gg 1\right.$ и $\left.\frac{k}{r} \ll 1\right)$, влиянием последних можно пренебречь. При этом (фиг. 31) поверхности уровня приближенно рассматриваются как цилиндры, общая ось которых совпадает с осью вращения сосуда, и давление в жидкости (определяемое только полем центробежных сил инерции)



Фиг. 31. Упрощенная схема относительного покоя при равномерном вращении сосуда.

$$p = p_0 + \gamma\frac{\omega^2}{2g}\left(r^2 - r_0^2\right), \qquad (13)$$

где p_0 — известное давление на поверхности уровня (например, свободной поверхности), радиус которой равен r_0. Аналогичное приближение возможно и при вращении вокруг вертикальной оси, если $\frac{\omega^2 r}{g} \gg 1$ и высота сосуда мала по сравнению с его радиусом.

ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПОТОКА РЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Установившееся движение. При установившемся движении жидкости скорость и давление в каждой точке потока не меняются со временем.

Уравнение неразрывности (расхода):

$$Q = F_1 v_1 = F_2 \cdot v_2 = \ldots = \\ = F \cdot v = \text{const}, \qquad (14)$$

где F — площадь живого сечения (нормального в каждой своей точке направлению движения частиц) и v — средняя скорость в данном сечении. Уравнение выражает постоянство вдоль потока расхода Q — объема жидкости, проходящего в единицу времени через каждое сечение. Единицы измерения Q — *м³/сек, л/сек, м³/час* и др.

Весовой расход: $G = Q \cdot \gamma$ *кГ/сек.*

Уравнение Бернулли, записанное для двух сечений потока (первое сечение — начальное):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \\ + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_n, \qquad (15)$$

где z — высота расположения центра тяжести сечения над произвольно выбранной горизонтальной плоскостью (плоскостью сравнения); p — давление (абсолютное или избыточное) в центре тяжести сечения; v — средняя скорость: $v = \frac{Q}{F}$; α — коэффициент кинетической энергии потока, безразмерная величина, представляющая отношение действительной кинетической энергии потока (вычисляемой по значениям местных скоростей $v_м$ в сечении) к кинетической энергии, вычисленной по средней скорости v:

$$\alpha = \frac{\int_F v_м^3 dF}{v^3 \cdot F} \approx 1 + 3 \frac{\int_F (v_м - v)^2 \cdot dF}{v^2 \cdot F}; \\ \alpha > 1.$$

Величина α зависит от закона распределения скоростей $v_м$ по сечению. При равномерном турбулентном движении $\alpha = 1{,}02 \div 1{,}1$ в зависимости от числа Рейнольдса и шероховатости стенок; в расчетах обычно принимают для труб $\alpha \approx 1$ и для каналов (открытые русла) $\alpha \approx 1{,}1$. Значения α при ламинарном режиме см. ниже.

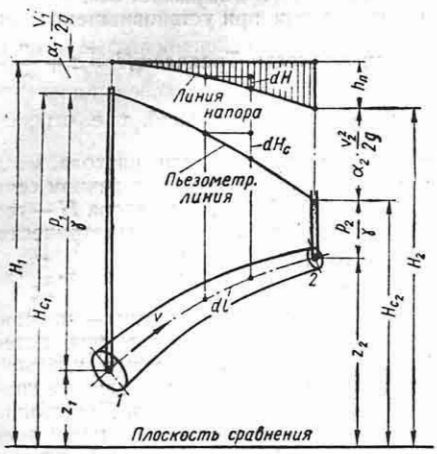
Уравнение (15) выражает закон сохранения энергии при установившемся движении жидкости. Трехчлен $H = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$ — запас удельной, т. е. отнесенной к единице весового расхода, механической энергии потока в данном сечении (напор). Слагаемые напора H — геометрический напор z, пьезометрический напор $\frac{p}{\gamma}$ и скоростной напор $\alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$ (называются также высотами) — представляют соответственно удельную потенциальную энергию положения, удельную работу сил давления и удельную кинетическую энергию потока. Потерянный напор h_n — уменьшение удельной энергии потока (ее необратимый переход в тепло) на участке между выбранными сечениями, выраженное в метрах столба жидкости.

Применимость уравнения (15) ограничена теми сечениями, где поток удовлетворяет условиям плавной изменяемости (кривизна траекторий и углы расхождения между ними весьма малы; живое сечение практически плоское). В промежутке между этими сечениями плавная изменяемость потока может отсутствовать. При турбулентном режиме движения, который характеризуется пульсациями местных скоростей, оперируют осредненными во времени параметрами потока (осредненные местные скорости и др.).

Потери напора h_n делятся на *потери трения* или *потери по длине* $h_{пт}$ (обусловливаемые тормозящим действием стенок на поток и непрерывно распределенные вдоль проходимого потоком пути) и *местные потери* $h_{пм}$ (обусловливаемые изменениями величины и направления скоростей частиц в так называемых местных сопротивлениях).

График уравнения Бернулли (фиг. 32) изображает распределение напоров вдоль потока. Изменение геометрического напора z дается положением осевой линии потока, изменение статического напора $H_c = z + \frac{p}{\gamma}$ — пьезометрической линией и полного напора H — линией напор-

Гидравлический уклон i — падение напора H (равное приращению потерянного напора h_n) на единице



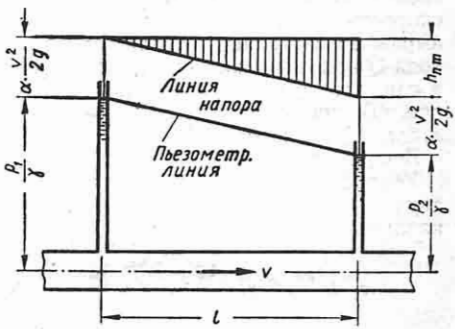
Фиг. 32. График уравнения Бернулли (эпюра высот) при установившемся движении реальной жидкости.

длины потока: $i = -\frac{dH}{dl} = \frac{dh_n}{dl}$ (всегда положителен).

Пьезометрический уклон $i_{пьез}$ — падение статического напора H_c на единице длины потока: $i_{пьез} = -\frac{dH_c}{dl}$ ($i_{пьез} \lessgtr 0$ в зависимости от геометрии потока).

Равномерное движение характеризуется неизменностью величины и направления скоростей частиц вдоль их прямолинейных и параллельных траекторий (живое сечение плоское и не меняется вдоль потока). Потери напора (потери трения) пропорциональны длине потока и равны падению статического напора: $h_{nm} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right)$. Линия напора и пьезометрическая линия — параллельные опускающиеся прямые: $i = i_{пьез} = \frac{h_{nm}}{l}$ (фиг. 33).

Кавитация — разрыв сплошности потока в тех местах, где падение абсолютного давления жидкости до упругости ее насыщенных паров приводит к интенсивному выделению пузырьков пара (кипению жидкости), сопровождаемому выделением растворенных в жидкости газов (воздуха). При продвижении потока в область повышенного давления происходит смыкание (конденсация) паровых пузырьков, приводящее к ударам частиц жидкости о стенки. Возникающие при этом очень большие местные повышения давления вызывают шумовые эффекты, вибрации и разъедание поверхности стенок — кавитационную коррозию (последней способствует и химическое действие выделяющегося кислорода). Кавитационные явления вызывают дополнительные потери энергии в потоке. Нормальная (бескавитационная) работа



Фиг. 33. Эпюра высот при равномерном движении реальной жидкости.

гидросистем обеспечивается наличием во всех точках потока запаса давления над упругостью насыщенных паров жидкости при данной температуре.

Неустановившееся движение

При неустановившемся движении характеристики потока в каждой его точке зависят от времени. Ниже рассматривается неустановившийся напорный поток (свободная поверхность жидкости отсутствует, и площадь живых сечений со временем не меняется) в предположении неупругости жидкости и стенок.

Уравнение неразрывности (14) остается справедливым для каждого данного момента времени.

Уравнение Бернулли, записанное для двух сечений потока в данный момент времени,

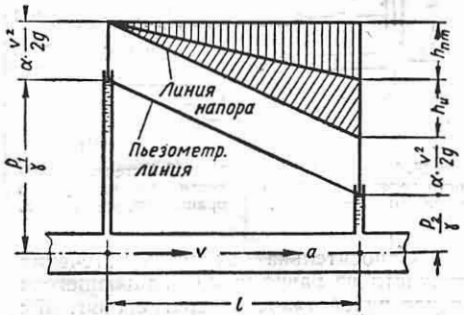
$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} + h_n + h_u \quad (16)$$

дополнительно включает инерционный напор

$$h_u = \frac{1}{g}\int_0^l \frac{\partial v}{\partial t}\cdot dl = \frac{1}{g}\frac{dQ}{dt}\int_0^l \frac{dl}{F} \qquad (17)$$

(l — длина оси потока между выбранными сечениями, F — переменная по длине оси площадь живого сечения). Инерционный напор выражает изменение в единицу времени кинетической энергии жидкости, заполняющей участок между выбранными сечениями, отнесенное к единице весового расхода потока. Подсчет h_u по формуле (17) предполагает, что поток плавно изменяется по всей длине данного его участка и что местные ускорения частиц в каждом сечении потока одинаковы и могут быть выражены через местное изменение во времени средней скорости $\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{F}\cdot\frac{dQ}{dt}$; последнее близко к действительности только при турбулентном режиме, для которого неравномерность скоростей по сечению невелика.

Инерционный напор положителен, если скорости со временем растут $\left(\frac{\partial v}{\partial t} > 0\right)$, что приводит к дополнительному (помимо потерь h_n) падению напора вдоль



Фиг. 34. Эпюра высот при неустановившемся движении реальной жидкости.

потока. Если скорости со временем убывают, инерционный напор отрицателен и является фактором возрастания напора потока по его длине.

В случае, когда F постоянно по длине потока (неустановившееся движение в цилиндрической трубе),

$$h_u = \frac{a}{g}\cdot l, \qquad (18)$$

где $a = \frac{dv}{dt}$ — одинаковое во всех сечениях ускорение потока, рассчитанное по изменению средней скорости (фиг. 34, где изображен случай $a > 0$).

Потери напора h_n подсчитываются приближенно по соотношениям, полученным для установившегося движения, в которые подставляются мгновенные значения средних скоростей. Общую теорию неустановившегося движения реальной жидкости в трубах см. [47].

Установившееся относительное движение. В случае подвижности стенок, ограничивающих поток, различают движение жидкости по отношению к подвижной системе отсчета, связанной со стенками (относительное движение), и по отношению к неподвижной системе отсчета (абсолютное движение). Относительная w и абсолютная v скорости частиц жидкости связаны соотношением

$$\bar{v} = \bar{w} + \bar{u},$$

где u — переносная скорость в данной точке пространства, определяемая законом движения граничных стенок по отношению к неподвижной системе отсчета.

Уравнение неразрывности (14) остается справедливым для относительного движения жидкости: $Q = F\cdot w = \text{const}$ по длине потока.

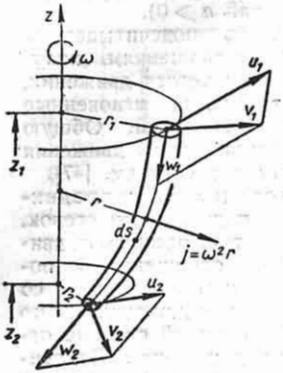
Уравнение Бернулли для установившегося относительного движения элементарной струйки:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + h_n - T, \qquad (19)$$

где z, p и w — вертикальная координата, давление и относительная скорость в данном сечении струйки; h_n — потеря напора на рассматриваемом участке струйки; T — удельная работа сил инерции переносного движения (в расчете на единицу веса жидкости) на относительном перемещении s между выбранными сечениями

$$T = \int_0^s \frac{j}{g}\cdot\cos\theta\cdot ds,$$

где j — единичная сила инерции переносного движения; g — ускорение силы тяжести, θ — угол между j и направлением относительного перемещения ds.



Фиг. 35. Установившееся движение жидкости по отношению к равномерно вращающейся системе отсчета.

Распространение уравнения (19) на поток конечного сечения (аналогичное случаю движения жидкости внутри неподвижных стенок) имеет приближенный характер в связи с тем, что дополнительные массовые силы (переносная и поворотная силы инерции) изменяют распределение относительных скоростей и давления в живых сечениях потока.

Если переносное движение стенок представляет равномерное вращение вокруг неподвижной оси с угловой скоростью ω (фиг. 35), работа центробежной силы инерции

$$T = \frac{\omega^2}{2g}\left(r_2^2 - r_1^2\right) = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g},$$

где $u = \omega \cdot r$ — переносная скорость, и уравнение Бернулли

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} =$$

$$= z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} + h_n. \quad (20)$$

В частном случае, когда $u_1 = u_2 = \text{const}$ (вращение при $r = \text{const}$ или равномерно-прямолинейное переносное движение),

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + h_n. \quad (21)$$

Уравнения (20) и (21) используются для изучения потока в колесах гидравлических турбомашин, где, в результате силового взаимодействия жидкости с вращающимися лопастями, потоку или сообщается механическая работа, увеличивающая его энергию (насос), или поток производит полезную механическую работу, уменьшая свою энергию (турбина). Удельная энергия, получаемая струйкой от лопастного колеса (основное уравнение турбомашин):

$$H_T = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}, \quad (22)$$

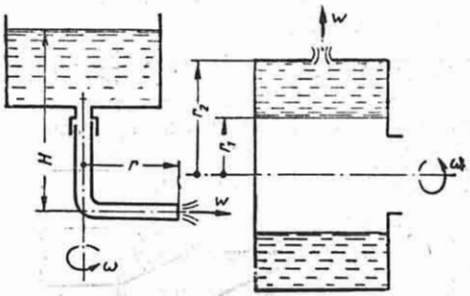
где индексы 1 и 2 относятся к сечениям струйки перед входом и после выхода из колеса. В насосе $H_T > 0$, в турбине $H_T < 0$.

Примеры приближенного переноса уравнения (20) на конечный поток:

а) Относительная скорость истечения жидкости через равномерно вращающуюся трубку (фиг. 36):

$$w = \varphi \cdot \sqrt{2g \cdot H + \omega^2 r^2}$$

$\left(\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}\right.$, где ζ — суммарный коэффициент сопротивления трубки).



Фиг. 36. Истечение жидкости через равномерно вращающуюся трубку.

Фиг. 37. Истечение жидкости из равномерно вращающегося сосуда.

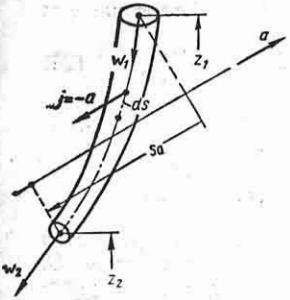
б) Относительная скорость истечения жидкости из равномерно вращающегося сосуда через малое отверстие (фиг. 37): $w = \varphi \cdot \omega \sqrt{r_2^2 - r_1^2}$ (весомостью жидкости пренебрежено).

В случае неравномерно-прямолинейного переносного движения стенок с ускорением a (фиг. 38) удельная работа переносной силы инерции

$$T = -\frac{a}{g} \cdot s_a,$$

где $s_a \gtrless 0$ — проекция относительного перемещения между выбранными сече-

ниями струйки на направление ускорения (на фиг. 38 $s_a < 0$ и $T > 0$). Уравнение Бернулли:



Фиг. 38. Установившееся движение жидкости по отношению к поступательно и равноускоренно движущейся системе отсчета.

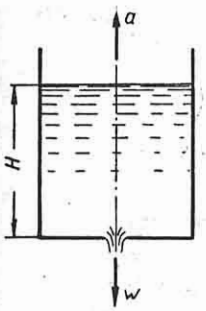
$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + \frac{a}{g} \cdot s_a + h_n. \quad (23)$$

Примеры использования уравнения (23):

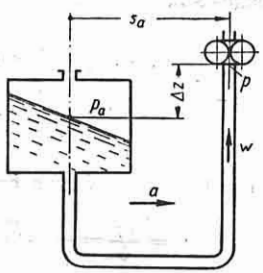
а) Относительная скорость истечения из сосуда, движущегося вверх с ускорением a (фиг. 39):

$$w = \varphi \sqrt{2gH\left(1 + \frac{a}{g}\right)}.$$

б) Давление всасывания перед насосом при движении системы с ускорением a



Фиг. 39. Истечение жидкости при равноускоренном движении сосуда по вертикали.



Фиг. 40. Давление всасывания перед насосом при равноускоренном движении системы по горизонтали.

по горизонтали и неизменной подаче насоса (фиг. 40):

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{p_0}{\gamma} - \Delta z - \frac{w^2}{2g} - h_n - \frac{a}{g} \cdot s_a$$

(h_n — потеря во всасывающей линии, определяемая по относительной скорости w).

РАВНОМЕРНОЕ НАПОРНОЕ ДВИЖЕНИЕ (движение в трубопроводах и щелях постоянного сечения при отсутствии свободной поверхности)

Наличие ламинарного или турбулентного режимов течения определяется значением числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{v \cdot D_\Gamma}{\nu}$ (v — средняя скорость в *м/сек*; D_Γ — гидравлический диаметр сечения в *м*, равный $D_\Gamma = \frac{4F}{\chi}$, где F — площадь и χ — периметр сечения; ν — кинематический коэффициент вязкости в *м²/сек*). При $\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{кр}$ ($\mathrm{Re}_{кр}$ — критическое число Рейнольдса) существует *ламинарное* течение (слоистое, без перемешивания частиц); при $\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{кр}$ — *турбулентное* течение, характеризуемое беспорядочным перемешиванием частиц и пульсациями местных скоростей. Значения $\mathrm{Re}_{кр}$ для сечений различной формы весьма близки между собой и находятся в интервале $\mathrm{Re}_{кр} = 2000 \div 2300$ [16], [42]. В расчетах обычно принимают для ламинарного режима $\mathrm{Re} \leqslant 2000$ и для турбулентного режима $\mathrm{Re} \geqslant 3000$ ($\mathrm{Re} = 2000$ до 3000 — критическая зона).

Потери напора h_{nm} (метры столба жидкости) или давления Δp ($кГ/м^2$) по длине потока выражаются общей формулой:

$$h_{nm} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \lambda \frac{l}{D_\Gamma} \frac{v^2}{2g}, \quad (24)$$

где l — длина трубы; v — средняя скорость; D_Γ — гидравлический диаметр сечения; γ — удельный вес жидкости; g — ускорение силы тяжести; λ — безразмерный коэффициент сопротивления трения.

Ламинарный режим. Круглая труба диаметра d $\left(D_\Gamma = d,\ \mathrm{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}\right)$. Распределение скоростей по сечению:

$$v_M = 2 \cdot v \left(1 - \frac{4y^2}{d^2}\right),$$

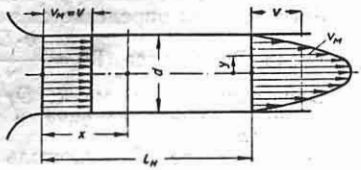
где v_M и v — местная и средняя скорости, y — расстояние точки от оси трубы (эпюра скоростей — параболоид вращения). Коэффициент кинетической энергии $\alpha = 2$.

Потеря напора (закон Пуазейля):

$$h_{nm} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{32\nu}{g} \frac{l \cdot v}{d^2} = \frac{128\nu}{\pi \cdot g} \frac{l \cdot Q}{d^4}, \quad (25)$$

откуда коэффициент сопротивления трения в формуле (24) $\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$.

Длина начального участка, на котором происходит формирование ламинарного потока, при плавном входе в трубу



Фиг. 41. Ламинарный поток в круглой трубе.

(фиг. 41) приближенно равна $l_н \approx 0{,}03d \times \mathrm{Re}$ [16]; по данным [32] $l_н \approx 0{,}04 \times d \cdot \mathrm{Re}$.

Табл. 13 дает приближенные значения коэффициента кинетической энергии α и коэффициента A в формуле $\lambda = \frac{A}{\mathrm{Re}}$ по длине x начального участка [37].

Возможны отклонения от формулы (25), связанные с переменностью вязкости по сечению потока в случае его неизотермичности [37].

Овальные сечения небольшой овальности могут рассчитываться как круглые, по формуле

$$h_{пт} = \frac{8\pi\nu l v}{gF},$$

где F — площадь сечения и v — средняя скорость.

Плоская щель бесконечной ширины высотой δ ($D_г = 2\delta$, $\mathrm{Re} = \frac{2 \cdot \delta \cdot v}{\nu}$, где $v = \frac{q}{\delta}$, q — расход на единицу ширины щели в $м^2/сек$).

Распределение скоростей по сечению:

$$v_M = \frac{3}{2} v \left(1 - \frac{4y^2}{\delta^2}\right),$$

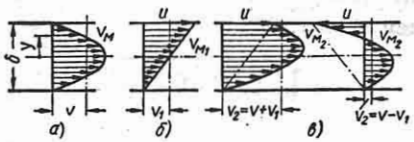
где y — расстояние точки от оси щели. Эпюра скоростей — параболический цилиндр (фиг. 42, *а*). Коэффициент кинетической энергии $\alpha = 1{,}54$. Потеря напора:

$$h_{пт} = \frac{12\nu}{g} \frac{l \cdot v}{\delta^2} = \frac{12\nu}{g} \frac{l \cdot q}{\delta^3}, \qquad (26)$$

откуда $\lambda = \frac{96}{\mathrm{Re}} = k \cdot \frac{64}{\mathrm{Re}}$, где коэффициент формы сечения $k = 1{,}5$.

Длина начального участка $l_н \approx 0{,}0225 \times \delta \cdot \mathrm{Re}$. [32].

Если одна из стенок щели движется параллельно другой со скоростью U, местные скорости, создаваемые увлекающим действием стенки $v_{M_1} = \frac{U}{2} \times \left(1 + \frac{2y}{\delta}\right)$ (фиг. 42, *б*). В зависимости от направления U по отношению к перепаду давления на концах щели Δp, распределение скоростей по сечению



Фиг. 42. Ламинарный поток в плоской щели.

$$v_{M_2} = v_M \pm v_{M_1} = \frac{3}{2} v \left(1 - \frac{4y^2}{\delta^2}\right) \pm \pm \frac{U}{2} \left(1 + \frac{2y}{\delta}\right)$$

(фиг. 42, *в*) и средняя скорость

$$v_2 = \frac{q_2}{\delta} = \frac{\Delta p}{\gamma \cdot l} \cdot \frac{g \cdot \delta^2}{12 \cdot \nu} \pm \frac{U}{2},$$

где q_2 — расход на единицу ширины щели (по отношению к неподвижной

Таблица 13

Начальный участок ламинарного потока в круглой трубе

$\frac{x}{d \cdot \mathrm{Re}} 10^3$	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	25	30
α	1	1,40	1,55	1,64	1,72	1,78	1,82	1,87	1,91	1,96	2
A	—	122	105	96,7	88	82,4	79,2	76,4	74,4	71,5	69,6

стенке). Напряжение сил жидкостного трения на подвижной стенке

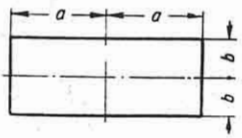
$$\tau = \frac{\Delta p \cdot \delta}{2 \cdot l} \mp \frac{U}{\delta} \mu.$$

Прямоугольная труба (фиг. 43)

$$a > b,\ D_\Gamma = \frac{4ab}{a+b},\quad \mathrm{Re} = \frac{4ab \cdot v}{(a+b)\nu}.$$

Коэффициент сопротивления трения в формуле (24)

$$\lambda = k \cdot \frac{64}{\mathrm{Re}}.$$



Фиг. 43.

Для квадратной трубы

$$\lambda = \frac{56{,}9}{\mathrm{Re}}$$ и

$h_{nm} = \frac{28{,}45 \cdot \nu}{g} \frac{l \cdot v}{(2a)^2}$. При $\frac{a}{b} \gg 1$ прямоугольная труба может рассчитываться как плоская щель. Приближенно для любого $\frac{a}{b}$

$$h_{nm} = \frac{10\nu}{3 \cdot g} \cdot l \cdot v \cdot \frac{a^2 + b^2}{a^2 \cdot b^2}.$$

Зависимость коэффициента формы k от $\frac{a}{b}$ для прямоугольной трубы

$\frac{a}{b}$	1	1,25	1,5	2	3	4	5	10	∞
k	0,889	0,898	0,919	0,971	1,068	1,139	1,192	1,322	1,5

Равносторонний треугольник со стороной a $\left(F = \frac{a^2}{4}\sqrt{3},\ D_\Gamma = \frac{a}{\sqrt{3}},\ \mathrm{Re} = \frac{a \cdot v}{\nu \cdot \sqrt{3}}\right)$ $\lambda = \frac{160}{3\,\mathrm{Re}}$ и потеря напора

$$h_{nm} = \frac{80\nu}{g} \frac{l \cdot v}{a^2}.$$

Приближенное решение для призматической трубы произвольного сечения см. [16].

Кольцевая труба с концентричными стенками (фиг. 44, *а* $D_\Gamma = 2(r_2 - r_1)$, $\mathrm{Re} = \frac{2(r_2 - r_1)v}{\nu}$).

Распределение скоростей

$$v_M = \frac{\Delta p}{4\mu \cdot l}\left[r_1^2 - r^2 + \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1}\right].$$

Потеря напора

$$h_{nm} = \frac{8\nu}{g} \cdot \frac{l \cdot v}{r_2^2 + r_1^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}}, \quad (27)$$

откуда коэффициент формы $\left(\frac{r_1}{r_2} = \xi\right)$

$$k = \frac{(1-\xi)^2}{1 + \xi^2 + \frac{1-\xi^2}{\ln \xi}}.$$

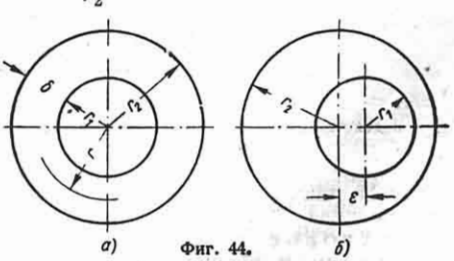
При $\xi \to 1$ $k \to 1{,}5$, следовательно, узкую кольцевую щель можно приближенно рассматривать как плоскую, определяя потерю напора по выражению

$$h_{nm} = \frac{12\nu}{g} \cdot \frac{l \cdot v}{\delta^2},$$

где $\delta = r_2 - r_1$. Если между осями внешнего и внутреннего цилиндров имеется эксцентриситет ε (фиг. 44, *б*), потеря напора

$$h_{nm} = \frac{8\nu}{g} \frac{l \cdot v}{r_2^2 + r_1^2 + \frac{\left(r_2^2 - r_1^2 - \varepsilon^2\right)^2}{\left(r_2^2 - r_1^2\right) \ln \frac{r_2 r_1}{r_2^2 - \varepsilon^2}}}. \quad (28)$$

При $\frac{r_1}{r_2}$ близком к единице (узкая



а) *б*)

Фиг. 44.

эксцентричная кольцевая щель) потеря напора приближенно равна

$$h_{nm} = \frac{12\nu}{g} \frac{l \cdot v}{\delta^2\left(1 + \frac{3}{2}\frac{\varepsilon^2}{\delta^2}\right)} \quad (29)$$

и расход через щель при данном перепаде давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ на ее концах:

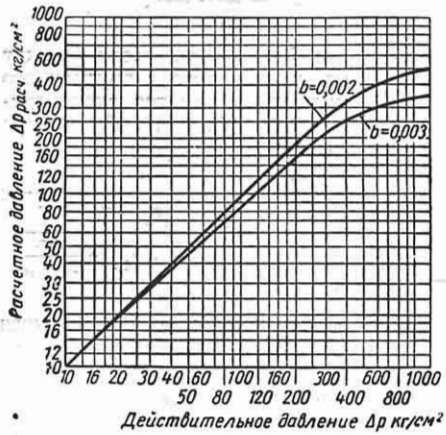
$$Q = \frac{2\pi r \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot l}\left(1 + \frac{3}{2}\frac{\varepsilon^2}{\delta^2}\right)\Delta p. \quad (30)$$

Когда $\varepsilon = \delta$ (внутренний цилиндр касается внешнего), расход возрастает в 2,5 раза по сравнению с концентричной щелью. При большом Δp следует учитывать переменность вдоль щели динамического коэффициента вязкости μ, зависящего от давления ($\mu = \mu_0 \cdot e^{bp}$, где μ_0 — вязкость при избыточном давлении $p = 0$; для машинных масел опытный коэффициент $b = 0{,}002 \div 0{,}003$). В случае $p_2 = 0$ и $\Delta p = p_1$ расход Q

$$Q = \frac{2\pi r \delta^3}{12\mu_0 \cdot l}\left(1 + \frac{3}{2}\frac{\varepsilon^2}{\delta}\right)\Delta p_{расч},$$

$$\Delta p_{расч} = \frac{1 - e^{-bp_1}}{b}.$$

Значения $\Delta p_{расч}$ в зависимости от действительного давления Δp приведены на фиг. 45. При уточненных расчетах учи-



Фиг. 45. Зависимость между расчетным $\Delta p_{расч}$ и действительным Δp перепадами давления в щели.

тывают также изменение температуры вдоль щели [39].

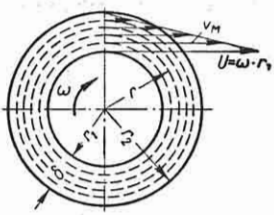
Круговое течение между неподвижным и вращающимся с угловой скоростью ω цилиндрами (фиг. 46). Распределение скоростей

$$v_M = \frac{r_1^2\left(r_2^2 - r^2\right)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{\omega}{r}.$$

Напряжение сил трения на внутреннем (вращающемся) цилиндре

$$\tau_1 = \frac{2\mu \cdot r_2^2 \cdot \omega}{r_2^2 - r_1^2}.$$

В узком зазоре $\left(\frac{r_1}{r_2}\right.$ близко к единице) течение мало отличается от течения в плоской щели, вызываемого параллельным перемещением одной из стенок; распределение скоростей $v_M = \frac{U}{\delta}(r_2 - r)$.



Фиг. 46. Поток между неподвижным и вращающимся цилиндрами.

Касательное напряжение $\tau_1 = \mu \cdot \frac{U}{\delta}$, где $U = \omega \cdot r_1$ — окружная скорость и $\delta = (r_2 - r_1)$ — зазор. Момент сил трения на вращающемся цилиндре высотой H (формула Н. П. Петрова [26])

$$M = 2\pi H \cdot \mu \frac{r^3 \cdot \omega}{\delta}. \quad (31)$$

Турбулентный режим. Потеря напора по длине трубопровода любого сечения выражается формулой (24). Для круглой трубы диаметра d

$$h_{пт} = \lambda \frac{l}{d}\frac{v^2}{2g} = 0{,}0827 \cdot \lambda \cdot l \frac{Q^2}{d^5} \quad (32)$$

и гидравлический уклон

$$i = \frac{\lambda}{d}\frac{v^2}{2g} = 0{,}0827\lambda\frac{Q^2}{d^5} = A \cdot Q^2 = \frac{Q^2}{K^2}, \quad (33)$$

где λ — безразмерный коэффициент сопротивления трения; A — удельное сопротивление ($сек^2/м^6$); K — расходная характеристика или модуль расхода ($м^3/сек$).

Средняя скорость потока (формула Шези):

$$v = C\sqrt{R \cdot i}, \quad (34)$$

где R — гидравлический радиус сечения $\left(R = \frac{F}{\chi}\right.$, F — площадь и χ — периметр сечения; для круглой трубы $R = \frac{d}{4}\Big)$; C — скоростной множитель ($м^{1/2}/сек$), связанный с λ соотношением $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$.

Различают три области, через которые проходит турбулентный поток по мере возрастания Re: 1) область гладкого трения — λ зависит только от Re; 2) переходная область — λ зависит от Re и состояния поверхности (шероховатости) стенок; 3) область вполне шероховатого трения—λ определяется шероховатостью стенок и не зависит от Re (квадратичный закон сопротивления).

Величина λ для гидравлически гладких труб определяется по формуле П. К. Конакова [11]: $\lambda = \frac{1}{(1{,}8 \lg \mathrm{Re} - 1{,}5)^2}$ или при $\mathrm{Re} \geqslant 5000$ по формуле Г. К. Филоненко [34]: $\lambda = \frac{0{,}3025}{(\lg \mathrm{Re} - 0{,}903)^2}$. Для $\mathrm{Re} \leqslant 10^5$ применима формула Блазиуса $\lambda = \frac{0{,}316}{\mathrm{Re}^{1/4}}$, в соответствии с которой $i = 0{,}0246 \frac{Q^{1{,}75} \cdot \nu^{0{,}25}}{d^{4{,}75}}$.

Таблица 14

Зависимость λ от Re для гидравлически гладких труб

Re	λ	Re	λ	Re	λ
4 000	0,0400	40 000	0,0225	400 000	0,0140
6 000	0,0360	60 000	0,0200	600 000	0,0130
8 000	0,0335	80 000	0,0190	800 000	0,0120
10 000	0,0315	100 000	0,0180	1 000 000	0,0115
15 000	0,0285	150 000	0,0165	2 000 000	0,0105
20 000	0,0270	200 000	0,0155	3 000 000	0,0100

Для оценки влияния шероховатости стенок на потери напора вводится так называемая эквивалентная абсолютная шероховатость Δ — условная линейная характеристика, определяемая из формулы Никурадзе для однородной зернистой шероховатости в квадратичной области

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \frac{d}{\Delta} + 1{,}14\right)^2} \qquad (35)$$

путем экспериментального определения в этой области коэффициента сопротивления трения λ ($\frac{\Delta}{d}$ — относительная шероховатость, $\frac{d}{\Delta}$ — относительная гладкость трубы).

Величины λ по формуле (35) даются табл. 15. Значения Δ, зависящие от ряда факторов (материал и способ изготовления, продолжительность эксплуатации трубы и качество жидкости — ее корродирующие свойства и способность выделять осадки) — см. ниже

Таблица 15

Зависимость λ от $\frac{d}{\Delta}$ в квадратичной области

$\frac{d}{\Delta}$	λ	$\frac{d}{\Delta}$	λ	$\frac{d}{\Delta}$	λ
100	0,0379	1100	0,0192	2 500	0,0159
200	0,0304	1200	0,0188	3 000	0,0153
300	0,0269	1300	0,0184	3 500	0,0148
400	0,0249	1400	0,0181	4 000	0,0144
500	0,0230	1500	0,0178	5 000	0,0137
600	0,0223	1600	0,0176	6 000	0,0132
700	0,0216	1700	0,0173	7 000	0,0128
800	0,0207	1800	0,0171	8 000	0,0125
900	0,0202	1900	0,0169	9 000	0,0122
1000	0,0197	2000	0,0167	10 000	0,0120

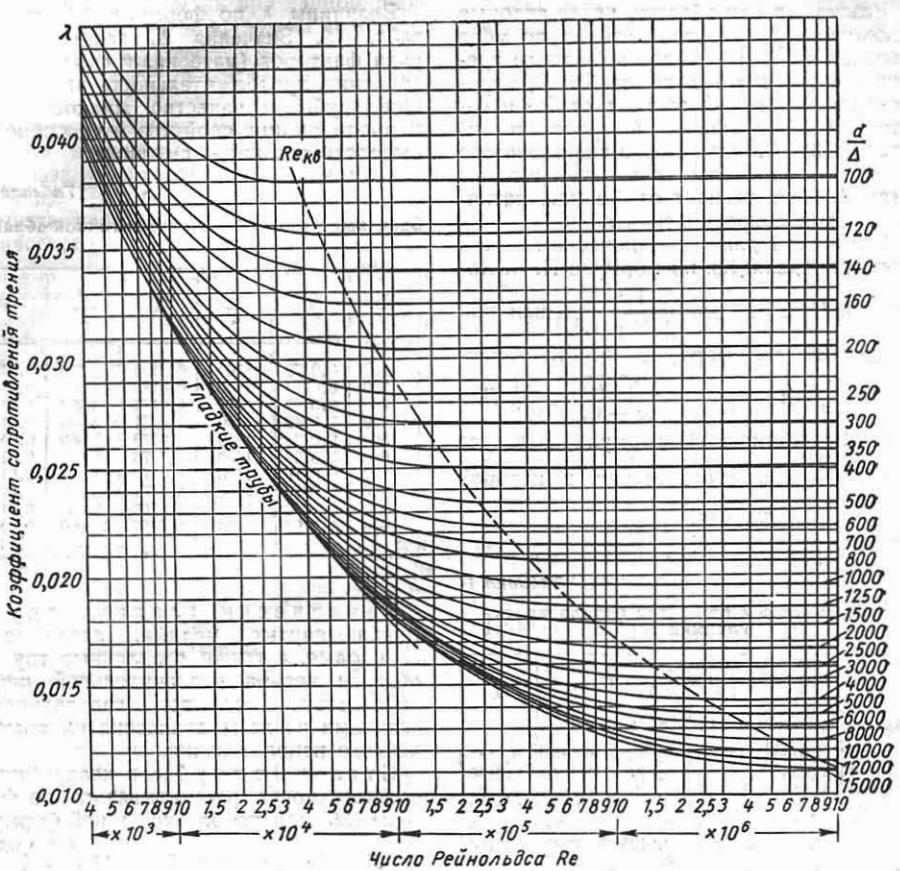
Технически гладкие трубы (цельнотянутые медные, латунные и свинцовые, а также стеклянные трубы), обладая весьма незначительной шероховатостью, являются гидравлически гладкими во всем диапазоне их практического использования.

Стальные трубы в квадратичной области могут рассчитываться по формуле (35) или по близкой к ней формуле Б. Л. Шифринсона $\lambda = 0{,}11 \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0{,}25}$.

Для незначительно корродированных стальных труб в средних расчетных условиях ($\Delta \approx 0{,}2$ *мм*) применима формула $\lambda = \frac{0{,}014}{d^{0{,}25}}$; потеря давления на единице длины трубы $\frac{\Delta p}{l} = 0{,}0827 \lambda \frac{G^2}{\gamma \cdot d^5}$ (G — весовой расход в *кГ/сек*) при указанном выражении для λ может определяться по номограмме на фиг. 48 [12].

При плохой защите от коррозии потери могут возрасти по сравнению с указанными в два и более раз ($\Delta = 1 \div 2$ *мм*).

По данным Ф. А. Шевелева (ВОДГЕО) [40] в квадратичной области для новых (некорродированных) стальных труб без стыков $\lambda = \frac{0{,}0121}{d^{0{,}226}}$ (соответствует $\Delta \approx 0{,}1$ *мм*), для новых труб с тщательно



Фиг. 47. График ВТИ для коэффициента сопротивления трения стальных труб.

Средние значения эквивалентной абсолютной шероховатости для стальных труб

Наименование трубопровода	Δ в *мм*
Трубопроводы из новых цельнотянутых труб	0,06÷0,1
Трубопроводы из цельнотянутых и сварных встык труб при незначительной коррозии	0,2
Паропроводы перегретого пара и водяные теплопроводы при наличии деаэрации и химической очистки подпиточной воды	0,1
Паропроводы насыщенного пара и водяные теплопроводы при незначительных утечках воды (до 0,5%) и деаэрации подпиточной воды	0,2
Паропроводы, работающие периодически, и конденсатопроводы с открытой системой возврата конденсата	0,5
Воздухопроводы сжатого воздуха от поршневых и турбокомпрессоров	0,8
Конденсатопроводы, работающие периодически, и водяные теплопроводы при отсутствии деаэрации и химической очистки воды и при больших утечках из сети (до 3%)	1

Значения λ для стальных трубопроводов при Δ ≈ 0,2 *мм*

d мм	15	25	50	100	200	300	400	500	600	800	1000
λ	0,040	0,035	0,030	0,025	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015	0,014

выполненными сварными стыками $\lambda = \frac{0{,}0143}{d^{0{,}226}}$ ($\Delta \approx 0{,}2$ *мм*), для корродированных в результате длительной эксплуатации водопроводных стальных и чугунных труб $\lambda = \frac{0{,}021}{d^{0.3}}$ ($\Delta \approx 1{,}3$ *мм*); расчетные таблицы согласно последней формуле см. в [41].

Стальные напорные трубопроводы ГЭС ($d > 400$ *мм*) рассчитываются по формуле акад. Н. Н. Павловского для скоростного множителя C [23] (формула охватывает широкий диапазон размеров и типов трубопроводов и открытых русел; применяется также при расчете чугунных, бетонных и других труб — см. ниже):

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}\,(\sqrt{n} - 0{,}10), \qquad (36)$$

где R — гидравлический радиус сечения в *м*, n — коэффициент шероховатости. По этой формуле коэффициент сопротивления трения для круглых труб $\lambda = 8g\frac{4^{2y} \cdot n^2}{d^{2y}}$ и удельное сопротивление $A = \frac{64}{\pi^2}\frac{4^{2y} \cdot n^2}{d^{5+2y}}$. Приближенно можно принимать $C = \frac{1}{n} R^{1{,}5\sqrt{n}}$ и $\lambda = 8g \cdot n^2 \times \left(\frac{4}{d}\right)^{3\sqrt{n}}$ при $R < 1$ *м*; $C = \frac{1}{n} R^{1{,}3\sqrt{n}}$ и $\lambda = 8g \cdot n^2 \left(\frac{4}{d}\right)^{2{,}6\sqrt{n}}$ при $R > 1$ *м*.

Значения коэффициента шероховатости n для напорных трубопроводов [10]

Характеристика поверхности трубопровода	n
Трубопровод со сварными встык поперечными и продольными швами, не стесняющими живого сечения	0,012
Трубопровод со сварными продольными и клепаными поперечными швами с одним рядом заклепок внахлестку	0,013
Трубопровод со сварными продольными и клепаными поперечными швами при двойном и более рядах заклепок внахлестку	0,014
Трубопроводы с клепаными продольными и поперечными швами внахлестку при малом числе заклепок и листах толщиной до 11 *мм*	0,0135
Трубопроводы с клепаными продольными и поперечными швами с накладками при большом числе заклепок (2 ряда и более) или при листах, толщиной более 12 *мм*	0,015

Переходная область имеет место в диапазоне чисел Рейнольдса $\mathrm{Re}_{гл} < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{кв}$. Значения $\mathrm{Re}_{гл}$ — нижней границы переходной области, отделяющей ее от области гидравлически гладких труб, ориентировочно выражаются зависимостью $\mathrm{Re}_{гл} \approx 6\left(\frac{d}{\Delta}\right)^{8/7}$ [36].

Значения $\mathrm{Re}_{гл}$ (нижняя граница переходной области)

$\frac{d}{\Delta}$	300	400	600	800	1 000
$\mathrm{Re}_{гл}$	4500	6000	9500	13 000	17 000
$\frac{d}{\Delta}$	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000
$\mathrm{Re}_{гл}$	37 000	83 000	132 000	183 000	230 000

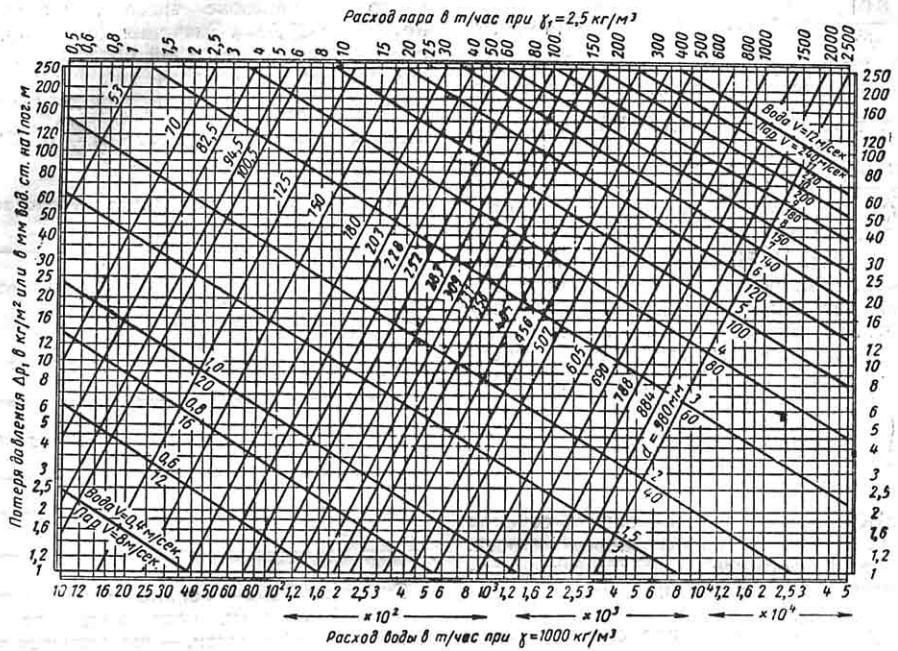
Значения $\mathrm{Re}_{кв}$ — верхней границы переходной области, отделяющей ее от квадратичной области, — выражаются зависимостью $\mathrm{Re}_{кв} = 220\left(\frac{d}{\Delta}\right)^{9/8}$ [21], см. фиг. 47.

Значения $\mathrm{Re}_{кв}$ (верхняя граница переходной области)

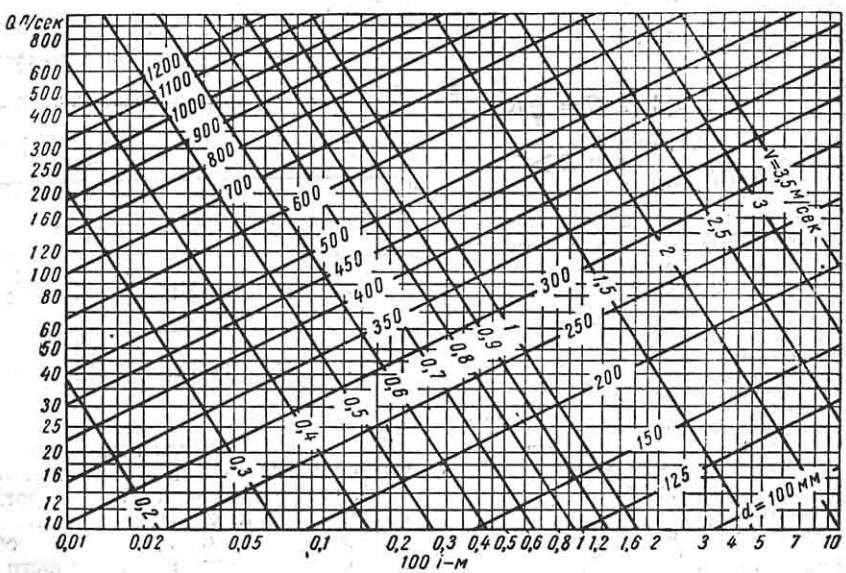
$\frac{d}{\Delta}$	100	200	400	600	800
$10^{-3} \cdot \mathrm{Re}_{кв}$	39	85	185	293	405
$\frac{d}{\Delta}$	1000	2000	4000	6000	8000	10 000
$10^{-3}\,\mathrm{Re}_{кв}$	522	1140	2500	3900	5400	7 000

По данным [40] для некорродированных стальных труб $\mathrm{Re}_{кв} = 2{,}4 \cdot 10^6 d$ (d — в *м*), что для воды при 10° С соответствует скорости $v_{кв} = 3{,}12$ *м/сек*.

Значения λ в переходной области определяются в зависимости от Re и $\frac{d}{\Delta}$ по графику Г. А. Мурина (ВТИ) [21], фиг. 47. По данным



Фиг. 48. Номограмма для гидравлического расчета стальных трубопроводов.



Фиг. 49. Номограмма для гидравлического расчета старых водопроводных труб.

Ф. А. Шевелева для новых стальных труб без стыков $\lambda = \frac{0{,}23}{d^{0{,}226}}\left(1{,}9\cdot10^{-6}+\frac{\nu}{v}\right)^{0{,}226}$, для новых стальных труб с тщательно выполненными сварными стыками $\lambda = \frac{0{,}272}{d^{0{,}226}}\left(1{,}9\cdot10^{-6}+\frac{\nu}{v}\right)^{0{,}226}$, для корродированных в результате длительной эксплуатации старых водопроводных стальных и чугунных труб $\lambda = \frac{1}{d^{0{,}3}}\times$ $\times\left(1{,}5\cdot10^{-6}+\frac{\nu}{v}\right)^{0{,}3}$, где d — в $м$, v — в $м/сек$ и ν — в $м^2/сек$ (формулы применимы во всей турбулентной области). Граница между переходной и квадратичной областью для старых труб $Re_{кв} = 9{,}2\cdot10^5\cdot d$ (d — в $м$).

Чугунные (водопроводные) трубы рассчитываются по формуле акад. Н. Н. Павловского (36), близко аппроксимируемой при постоянном $y = \frac{1}{7}$ и значениях коэффициента шероховатости: для новых чугунных труб $n = 0{,}012$ $\left(\text{удельное сопротивление } A = \frac{0{,}00139}{d^{5{,}286}}\right)$ и для старых чугунных (также и стальных) водопроводных труб в нормальных условиях эксплуатации, исключающих загрязнения, $n = 0{,}013$ $\left(A = \frac{0{,}00163}{d^{5{,}286}}\right)$ [1].

Значения удельного сопротивления A в $сек^2/м^6$ и λ для чугунных труб

d в $мм$	Новые трубы		Старые трубы	
	A	λ	A	λ
100	268	0,0325	314	0,0380
150	31,4	0,0289	36,8	0,0338
200	6,86	0,0265	8,06	0,0312
300	0,805	0,0236	0,945	0,0278
400	0,176	0,0218	0,207	0,0257
500	0,0541	0,0205	0,0635	0,0240
600	0,0206	0,0193	0,024	0,0225
700	0,00914	0,0186	0,0107	0,0218
800	0,00451	0,0179	0,00529	0,0210
900	0,00242	0,0173	0,00284	0,0202
1000	0,00139	0,0168	0,00163	0,0197

Потери напора в старых трубах (на 100 $м$ длины трубы — $100 \cdot i$) можно определять по номограмме фиг. 49. Для старых труб в средних расчетных условиях применяется также выражение $A = \frac{0{,}00161}{d^{5{,}33}}$ $\left(\lambda = \frac{0{,}0195}{d^{1/3}}\right)$; для загрязненных в результате длительной эксплуатации водопроводных труб $\lambda = \frac{0{,}0254}{d^{1/3}}$.

См. также приведенные выше новые данные [40].

Паропроводы и газопроводы при малых перепадах давления, позволяющих считать γ постоянным, рассчитываются по формулам для несжимаемых жидкостей. При больших перепадах связь между абсолютным давлением p_1 в начале трубопровода и p_2 в конце трубопровода в предположении изотермичности расширения газа имеет вид:

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2\cdot R\cdot T} = 0{,}0827\lambda l\cdot\frac{G^2}{d^5}$$

(G — весовой расход, R — газовая постоянная и T — абсолютная температура),

$$\text{или } \Delta p = 0{,}0827\lambda l\,\frac{G^2}{\gamma_{cp}\cdot d^5},$$

где γ_{cp} — средний удельный вес при

$$p_{cp} = \frac{p_1 + p_2}{2}.$$

Значения $\frac{\Delta p_1}{l}$ по указанной формуле при $\Delta \approx 0{,}2\ мм$ $\left(\lambda = \frac{0{,}014}{d^{0{,}25}}\right)$ и $\gamma_{cp1} = 2{,}5\ кГ/м^3$ даны на номограмме фиг. 48 (при другом удельном весе $\Delta p_2 = 2{,}5\frac{\Delta p_1}{\gamma_{cp_2}}$).

Нефтепроводы. Стальные нефтепроводы рассчитываются по эквивалентной абсолютной шероховатости $\Delta \approx 0{,}2\ мм$ с использованием графика Г. А. Мурина, фиг. 47. Применяется также выражение

$$\lambda = 0{,}0096 + \frac{a}{\sqrt{d}} + \frac{1{,}73}{\sqrt{\mathrm{Re}}},$$

где $a = (25 \div 40)\cdot10^{-4}$ (d — в $м$).

Асбестоцементные трубы. Гидравлический уклон определяется по формуле А. М. Кукушкина

$$i = 0{,}000854\,\frac{Q^{1{,}818}}{d^{4{,}873}}.$$

Для учета старения (коррозия и выделение осадков из воды) i следует увеличивать на 15—20%.

Бетонные и железобетонные трубопроводы. Средние значения коэффициента шероховатости в формуле Н. Н. Павловского (36): трубопроводы без штукатурки в деревянной опалубке $n = 0{,}013 \div 0{,}014$ и в металлической опалубке $n = 0{,}012$; трубопроводы с заглаженной и затертой штукатуркой $n = 0{,}012 \div 0{,}014$ (в зависимости от качества работ). Числовые значения скоростного множителя C — см. табл. 17.

Деревянные трубы из клепок. Среднее значение коэффициента шероховатости в формуле акад. Н. Н. Павловского $n = 0{,}011$. В практике расчетов применяется также формула $i = 0{,}000885 \frac{v^{1,8}}{d^{1,17}}$ (v — в *м/сек*, d — в *м*), учитывающая влияние Re в связи с малой шероховатостью стенок.

Удельное сопротивление гибких тканевых рукавов — см. табл. 16, где значения A в *сек²/дм⁶* отвечают расходу Q в *л/сек* [18].

Таблица 16

Удельное сопротивление A в *сек²/дм⁶* и λ для гибких (тканевых) рукавов

Диаметр d в *мм*	Характеристика рукавов			
	Непрорезиненные		Прорезиненные	
	A	λ	A	λ
45	0,0275	0,0615	0,0133	0,0295
50	0,0155	0,0585	0,0075	0,0285
65	0,00385	0,0540	0,00175	0,0245
76	0,0015	0,046	0,00075	0,023

Резиновые рукава гладкие неармированные, в области $\mathrm{Re} = 5000 \div 120\,000$ рассчитываются по уравнению $\lambda = \frac{a}{\mathrm{Re}^{0,265}}$, где $a = 0{,}4 \div 0{,}5$ в зависимости от качества изготовления [46]; следует учитывать возрастание внутреннего диаметра с давлением (до 15% при $p = 3$ *ати*). Резиновые рукава, армированные внутри стальной спиралью, соприкасающейся с протекающей жидкостью, работают в квадратичной области сопротивления при $\mathrm{Re} > 4000$.

Повышение давления до $p = 3$ *ати* увеличивает внутренний диаметр на 3%.

Для гладких резиновых рукавов с внутренней армировкой λ значительно возрастает при повышении давления; см. [46].

Значения λ для армированных изнутри резиновых рукавов

d в *мм*	25	32	38	50	65
λ	0,051—0,057	0,053—0,066	0,072—0,090	0,083—0,094	0,085—0,100

Трубы некруглого сечения рассчитываются по формулам, приведенным выше для круглых труб, с заменой в них диаметра d гидравлическим диаметром $D_\Gamma = \frac{4F}{\chi}$ (F — площадь и χ — периметр сечения).

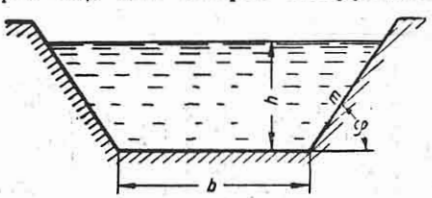
РАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Равномерное безнапорное движение характеризуется наличием свободной поверхности с постоянным (атмосферным) давлением. Гидравлический уклон i, равный геометрическому уклону свободной поверхности и уклону дна канала, связан со средней скоростью v и расходом Q соотношениями

$$v = C\sqrt{R \cdot i}, \quad Q = F \cdot C\sqrt{R \cdot i}. \quad (37)$$

Гидравлический радиус $R = \frac{F}{\chi}$, где F — площадь и χ — смоченный периметр сечения. Значения скоростного множителя C, определяемые по формуле Н. Н. Павловского (36), даны в табл. 17.

Основной формой поперечного сечения каналов является трапецоидальная (фиг. 50), для которой коэффициент



Фиг. 50.

откоса $m = \mathrm{ctg}\,\varphi$ зависит от категории грунта и вида облицовки.

Для песчаных грунтов $m = 3 \div 3{,}5$, суглинков и глин $m = 1 \div 1{,}5$, скальных пород $m = 0{,}5 \div 1{,}0$; для бетонированных откосов принимают $m = 1{,}25 \div 1{,}75$.

Значения коэффициента шероховатости n для каналов [10]

Характеристика поверхности	Среднее значение n
Бетонная или железобетонная облицовка без штукатурки и затирки:	
гладкий бетон при хорошо сплоченной опалубке, без выступов и впадин	0,014
шероховатый бетон со следами опалубки (впадины, отпечатки) вследствие неплотной пригонки досок опалубки	0,016
Бетонная и железобетонная оштукатуренная или заглаженная облицовка:	
при высоком качестве работ — чистая цементная штукатурка и безукоризненно заглаженная поверхность	0,011
при хорошем качестве работ — поверхность сглажена и выровнена, швы расширения заглажены	0,012
Облицовка из тесаного камня	0,015
Бутовая кладка на цементном растворе	0,025
Кирпичная кладка на цементном растворе	0,015
Деревянные лотки из клепок	0,012
Земляные каналы:	
каналы в лессе, плотном гравии, плотной земле, затянутые илистой пленкой без насосов	0,020
большие каналы в хороших условиях эксплуатации и ухода	0,0225
большие каналы в средних условиях и малые — в хороших условиях эксплуатации и ухода	0,025
каналы с неправильным профилем, сильно заросшие и засоренные	0,035
Каналы в необлицованной скале при средних условиях (сглаженные стенки)	0,025—0,035
Каналы, чисто высеченные в необлицованной скале	0,020—0,025

Таблица 17

Значения скоростного множителя C по формуле Н. Н. Павловского

R в $м$ \ n	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,017	0,018	0,020	0,0225	0,025	0,030	0,035
0,10	67,36	60,33	54,46	49,43	45,07	38,00	35,06	30,85	26,18	22,48	17,50	14,00
0,12	69,00	61,92	56,00	50,86	46,47	39,29	36,34	32,05	27,29	23,56	18,40	14,80
0,14	70,36	63,25	57,30	52,14	47,74	40,47	37,50	33,10	28,26	24,48	19,23	15,54
0,16	71,64	64,50	58,46	53,29	48,80	41,53	38,50	34,05	29,15	25,28	19,96	16,20
0,18	72,73	65,58	59,46	54,29	49,80	42,47	39,45	34,90	29,95	26,04	20,63	16,80
0,20	73,73	66,50	60,46	55,21	50,74	43,35	40,28	36,65	30,71	26,76	21,23	17,34
0,30	77,73	70,42	64,23	58,93	54,34	46,82	43,67	38,85	33,69	29,60	23,80	19,68
0,40	80,73	73,33	67,08	61,72	57,07	49,41	46,28	41,25	36,00	31,80	25,80	21,51
0,50	83,09	75,67	69,31	63,30	59,27	51,59	48,39	43,25	37,91	33,64	27,46	23,06
0,60	85,09	77,58	71,23	65,86	61,14	53,41	50,17	44,90	39,51	35,20	28,90	24,40
0,70	86,82	79,25	72,93	67,50	62,74	54,94	51,73	46,40	40,93	36,60	30,16	25,57
0,80	88,27	80,75	74,46	68,93	64,20	56,35	53,12	47,70	42,22	37,84	31,30	26,66
0,90	89,64	82,17	75,69	70,22	65,47	57,64	54,39	48,90	43,37	38,96	32,36	27,66
1,00	90,91	83,33	76,92	71,43	66,67	58,82	55,56	50,00	44,44	40,00	33,33	28,57

Гидравлически наивыгоднейшим является сечение, которое при заданных F и i пропускает наибольший расход Q, что имеет место при наименьшем смоченном периметре χ (максимальном R).

Для трапецоидальной формы наивыгоднейшее наполнение канала h определяется из выражения:

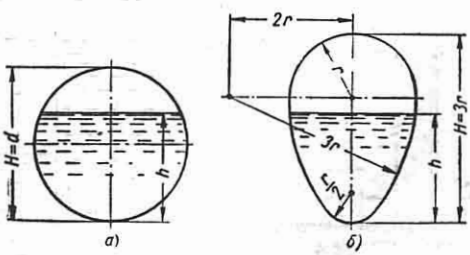
$$\frac{b}{h} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right);$$

при $m = 0$ (прямоугольное сечение) $h = 0{,}5b$.

Для каналов замкнутого профиля (круговой, фиг. 51, *а*, и овоидальный, фиг. 51, *б*) изменение средней скорости v и расхода Q в зависимости от наполнения h дано на фиг. 52, *а* в виде кривых

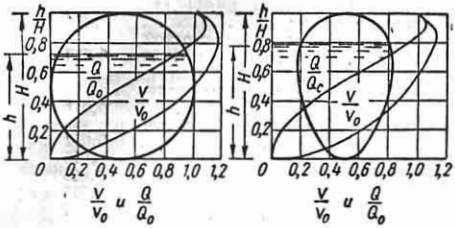
$$\frac{v}{v_0} = f_1\left(\frac{h}{H}\right) \text{ и } \frac{Q}{Q_0} = f_2\left(\frac{h}{H}\right),$$

где v_0 и Q_0 — скорость и расход при работе канала полным сечением.



Фиг. 51. Каналы замкнутого профиля.

Выбор скоростей по условиям незаиляемости каналов и неразмываемости стенок см. [10].



Фиг. 52. Изменение пропускной способности и скорости в зависимости от наполнения канала замкнутого профиля.

ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

Малые отверстия — характеризуются небольшими линейными размерами по сравнению с величиной $H+\frac{p_1-p_2}{\gamma}$ (фиг. 53), при которых скорости всех частиц жидкости в сжатом сечении струи $x-x$ практически одинаковы и равны средней скорости v, вычисляемой по формуле

$$v=\varphi\sqrt{2g\left(H+\frac{p_1-p_2}{\gamma}+\frac{v_1^2}{2g}\right)}=\varphi\sqrt{2gH'}, \qquad (38)$$

где p_1 и v_1 — давление и скорость жидкости в сечении резервуара, проведенном перпендикулярно скорости v_1 и отстоящем от оси отверстия на расстоянии H по вертикали (в частности H — расстояние отверстия до свободной поверхности резервуара); φ — коэффициент скорости, связанный с величиной коэффициента сопротивления ζ уравнением:

$$\varphi=\frac{1}{\sqrt{\alpha+\zeta}}=\frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}$$

[если принять коэффициент кинетической энергии для струи $\alpha=1$, см. формулу (15)].

Коэффициент ζ определяет потерю $h_{пм}$ напора при истечении

$$h_{пм}=\zeta\frac{v^2}{2g}.$$

При $p_1=p_2$ и $v_1\approx 0$ (когда сечение резервуара велико сравнительно с площадью отверстия)

$$v=\varphi\sqrt{2gH}. \qquad (39)$$

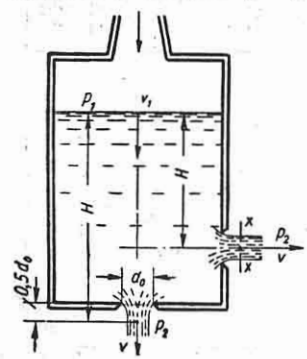
Величина $\sqrt{2gH}=v_T$ — теоретическая скорость струи, H — напор, под которым происходит истечение.

Площадь f_c сжатого сечения $x-x$ струи обычно меньше площади отверстия f_0 из-за воздействия частиц жидкости, движущихся к отверстию радиально. Величина $\varepsilon=\frac{f_c}{f_0}$ — коэффициент сжатия струи.

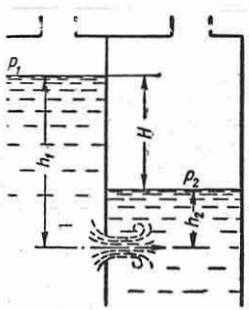
Расход Q жидкости через отверстие вычисляется по формуле

$$Q=\mu f_0\sqrt{2gH'}=f_0\cdot v\cdot\varepsilon, \qquad (40)$$

где коэффициент расхода $\mu=\varphi\cdot\varepsilon$.



Фиг. 53. Истечение под постоянным напором.



Фиг. 54. Истечение под уровень.

При истечении под уровень (фиг. 54) расход определяется по той же формуле (40), а

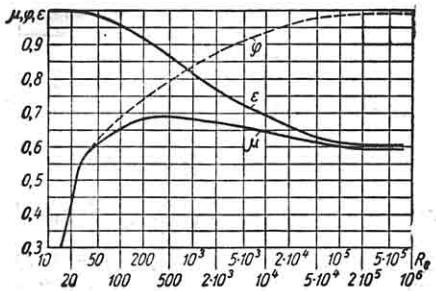
$$H'=\left(\frac{p_1}{\gamma}+h_1\right)-\left(\frac{p_2}{\gamma}+h_2\right);$$

если же $p_1=p_2$, то $H'=H=h_1-h_2$. Коэффициенты расхода μ в этом случае практически совпадают с μ при свободном истечении струи в атмосферу.

Коэффициенты μ, φ и ε малого отверстия зависят от формы отверстия, толщины и формы кромки отверстия, от числа Рейнольдса Re. Для круглого отверстия в тонкой стенке зависимость величин μ, φ и ε от

$$\mathrm{Re}=\frac{\sqrt{2gH}\cdot d_0}{\nu} \qquad (41)$$

(d_0 — диаметр отверстия, ν — кинематический коэффициент вязкости) выражается графиками фиг. 55 [3]. Коэффициенты расхода μ круглого отверстия

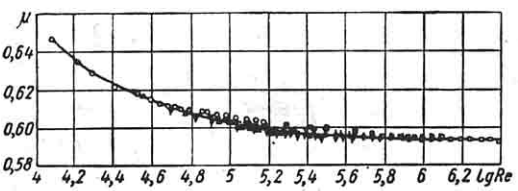


Фиг. 55. Коэффициенты μ, ε и φ для круглых отверстий.

в тонкой стенке для практически наиболее важной области чисел Re, как это следует из графика фиг. 56, таковы:

Re	$1{,}5\cdot10^4$	$2{,}5\cdot10^4$	$5\cdot10^4$	10^5	$2{,}5\cdot10^5$	$5\cdot10^5$	$\geqslant 10^6$
μ	0,638	0,623	0,610	0,603	0,597	0,594	0,593

Коэффициент скорости φ с увеличением Re возрастает до величины, близкой к единице (фиг. 55), а коэффициент сжатия уменьшается до значения $\varepsilon \approx$ $\approx 0{,}61$.



Фиг. 56. Коэффициенты расхода для круглых отверстий.

Для квадратных отверстий в тонкой вертикальной стенке коэффициенты расхода μ при истечении воды в атмосферу определяются табл. 18, а для прямоугольных отверстий — табл. 19 [23]; эти таблицы содержат величины μ и для больших отверстий.

Для приближенных расчетов истечения маловязких жидкостей через прямоугольные и круглые отверстия в тонкой стенке можно принять $\mu \approx 0{,}6 \div 0{,}61$; $\varphi \approx 0{,}97$; $\varepsilon \approx 0{,}62 \div 0{,}63$.

Большие отверстия в вертикальной стенке формируют струю с переменными скоростями по живому сечению, бо́льшими в нижней части сечения за счет влияния силы тяжести. Расход через большие отверстия можно определять по формуле (40), где H берется до центра тяжести отверстия. Коэффициент расхода μ в этом случае зависит не только от формы отверстия и его кромки, от числа Re, но также и от числа Фруда $\mathrm{Fr} = \frac{H}{h}$ (h — высота отверстия). Систематических данных по μ для больших отверстий нет, для воды см. табл. 18 и 19.

Несовершенное и неполное сжатие струи. Значения коэффициента расхода μ в табл. 18—19 справедливы лишь для так называемого *совершенного сжатия* струи, когда соседние стенки резервуара не влияют на формирование струи. Условия совершенного сжатия для прямоугольного отверстия: $l_1 \geqslant 3a$, $l_2 \geqslant 3b$; для круглого отверстия: $l \geqslant 3d$ (фиг. 57). Несоблюдение этих условий приводит к *несовершенному сжатию* струи, при котором возрастает коэффициент сжатия ε, а следовательно, и μ. При истечении через центрально-расположенное отверстие площадью f_0 в резервуаре с площадью сечения $F \leqslant 10f_0$ (фиг. 58) коэффициент

Таблица 18

Величины $\mu \cdot 10^3$ для квадратных отверстий

Напор H в *м*	Сторона квадрата в *см*					
	0,6	1,5	3,0	6,0	18,0	30,0
0,2	656	628	616	605	599	596
0,4	642	618	610	605	602	601
1,2	628	610	606	605	603	602
3,0	616	606	604	603	602	601
6,0	606	603	602	602	601	600
30,0	599	598	598	598	598	598

Таблица 19

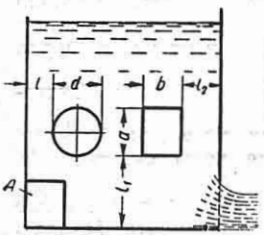
Величины $\mu \cdot 10^3$ для прямоугольных отверстий

Напор в *м* над верхним ребром отверстия	Ширина отверстия $b = 0{,}2$ *м*						$b = 0{,}6$ *м*	
	Высота отверстия h в *см*							
	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	2,0	20,0
0,1	666	654	637	630	611	592	639	602
0,5	644	640	630	628	617	603	630	607
1,0	632	633	628	626	615	605	626	605
2,0	611	612	612	613	607	601	620	602
3,0	609	610	608	606	603	601	615	601

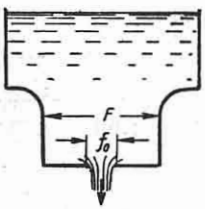
расхода $\mu_{нс}$ будет определяться уравнением

$$\mu_{нс} = \mu (1 + k), \qquad (42)$$

где μ — коэффициент расхода при совершенном сжатии; k — коэффициент, зависящий от отношения f_0/F и определяемый табл. 20 для круглых и прямоугольных отверстий [23].



Фиг. 57. Влияние боковых стенок на сжатие струи.



Фиг. 58.

Возрастание ε и μ происходит и при так называемом *неполном сжатии*, когда часть Π' периметра Π кромки отверстия смыкается с поверхностью соседних стенок (фиг. 57, *А*). Коэффициент расхода для такого случая $\mu_{нп}$ приближенно выражается формулой

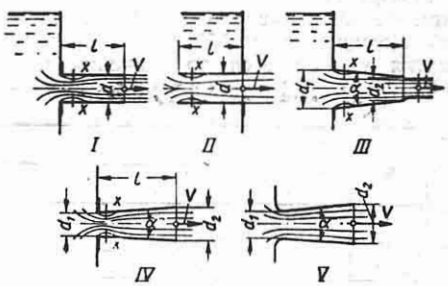
$$\mu_{нп} \approx \mu \left(1 + 0{,}14 \frac{\Pi'}{\Pi}\right),$$

где μ — коэффициент расхода при совершенном сжатии.

Насадки — короткие трубы, обычно — круглого сечения.

Скорость истечения v и расход Q через насадки определяются формулами (38) — (40). Коэффициенты φ, ε и μ зависят от формы насадков и числа Рейнольдса Re [см. формулу (41)]. При значениях $\mathrm{Re} \geqslant 10^5$ коэффициенты φ, ε и μ зависят в основном только от формы насадков; ниже приводятся их величины для этой области значений Re.

Внешний цилиндрический насадок (фиг. 59, *I*) имеет постоянный диаметр d и длину $l = (2 \div 3)\, d$. Внутри насадка образуется наименьшее, сжатое сечение струи $x - x$. При нормальной работе насадка струя на выходе из него заполняет все сечение, т. е. коэффициент



Фиг. 59. Насадки.

сжатия $\varepsilon = 1$. В этом случае основная потеря в насадке — потеря на расшире-

Таблица 20

Значения $100 \cdot k$ в формуле (42)

f_0/F	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Круглое отверстие	1,4	3,4	5,9	9,2	13,4	18,9	26,0	35,1	47,1
Прямоугольное отверстие	1,9	4,2	7,1	10,7	15,2	20,8	27,8	36,5	47,3

ние струи, коэффициент сопротивления $\zeta = 0{,}5$, а коэффициенты скорости и расхода одинаковы $\varphi = \mu = 0{,}82$. При таком режиме работы насадка и истечении в атмосферу внутри насадка образуется вакуум $p_в$, составляющий примерно $p_в \approx 0{,}75H\gamma$. Поэтому работа насадка сплошным сечением возможна только при напорах, меньших предельного $H_{пр} \approx \dfrac{p_a - p_{нп}}{0{,}75\gamma}$, где $p_{нп}$ — давление насыщенных паров жидкости. Для холодной воды $H_{пр} \approx 14$ *м*. При $H > H_{пр}$ струя отрывается от стенок насадка; при этом наступает режим истечения через отверстие в тонкой стенке.

Увеличение длины l насадка уменьшает μ из-за возрастания потерь трения; укорочение насадка сверх $l = 1{,}5d$ также снижает μ, вследствие незаполнения струей части сечения насадка на выходе (см. таблицу).

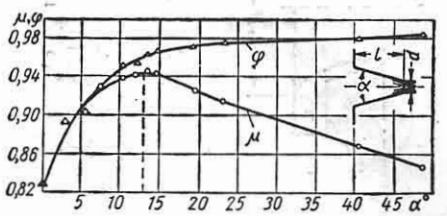
Значения μ в зависимости от l/d

$\frac{l}{d}$	2—3	12	24	36	48	60
$\mu = \varphi$	0,82	0,77	0,73	0,68	0,63	0,6

Внутренний цилиндрический насадок (фиг. 59, *II*) с тонкими заостренными стенками при работе под напором меньше предельного ($H < H_{пр}$) имеет в среднем коэффициенты истечения: $\varepsilon = 1$; $\zeta = 1$; $\mu = \varphi = 0{,}71$. Большее значение ζ по сравнению с внешним цилиндрическим насадком объясняется бо́льшим сжатием струи внутри насадка ($\varepsilon_x \approx 0{,}53$), что является также и причиной снижения величины предельного напора $H_{пр} \approx \dfrac{p_a - p_{нп}}{0{,}94\gamma}$; если $H \gg H_{пр}$, то насадок работает как отверстие с $\mu \approx 0{,}51$. Увеличение толщины δ стенки насадка на входе ведет к снижению ζ и возрастанию μ; при $\delta \geqslant 0{,}05d$ внутренний насадок работает с теми же коэффициентами, что и внешний цилиндрический насадок, т. е. $\zeta \approx 0{,}5$, $\mu \approx 0{,}82$.

Конический сходящийся насадок (фиг. 59, *III*). Его коэффициенты ε, φ и μ зависят от угла конусности α и длины l. Величины μ и φ для насадка, длиной $l \approx 2{,}7d$ при разных углах α приведены на графиках фиг. 60 [2]. Наибольший коэффициент расхода этого насадка $\mu_{max} = 0{,}945$; при этом $\varphi = 0{,}96$ и $\varepsilon = 0{,}985$, а угол $\alpha \approx 13°$.

Конический расходящийся насадок (фиг. 59, *IV*) имеет внутри давление меньшее, чем на выходе, что обусловлено как постепенным расширением проходящего потока, так и наличием сжатого сечения $x - x$. При свободном изливе в атмосферу струя заполняет все выходное сечение насадка лишь при относительно небольших напорах, если при этом угол конусности насадка $\alpha < 15°$; в этом случае $\varepsilon = 1$, а $\mu = \varphi$ зависит от α и l. Для насадка с $\alpha = 6°$ и $l = 8d_1$ (без скругления на входе) коэффициент $\mu = \varphi = 0{,}46$ [7]. Насадки со скруглением на входе (фиг. 59, *V*) имеют коэффициенты $\mu = \varphi$, определяемые табл. 21.



Фиг. 60. Коэффициенты расхода μ и скорости φ для сходящегося насадка.

Таблица 21

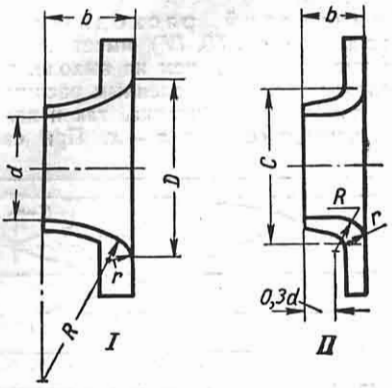
Величины $\mu = \varphi$ для расходящихся насадков

Длина $\frac{l}{d_1}$	Угол конусности $\alpha°$					
	3°	5°	7,5°	10°	12,5°	15°
4,9	0,86	0,83	0,71	0,57	0,45	0,32
9,8	0,73	0,61	0,44	0,32	0,22	0,15
14,7	0,62	0,45	0,29	0,18	0,12	0,08

Расходящиеся насадки пропускают больший расход по сравнению с насадками других типов, имеющих такой же входной диаметр d_1.

Цилиндрический насадок со скругленным входом не имеет сжатия струи на выходе ($\varepsilon = 1$); обладает высокими коэффициентами скорости $\varphi = 0{,}97 \div 0{,}99$. К числу таких насадков относятся: 1) коноидальные насадки (фиг. 61, *I*), форма которых близка к профилю сжатой струи; 2) сопла для

измерения расхода (фиг. 61, *II*); 3) насадки со скруглением на входе, выполненным одним радиусом $r \geqslant 0{,}15d$; 4) пожарные насадки (спрыски) и т. п.



Фиг. 61. I — коноидальный насадок: $b = 0{,}875 \cdot d$; $D = 1{,}7 \cdot d$; $R = 1{,}54 \cdot d$; $r = 0{,}25 \cdot d$; II — сопло: $b = 0{,}604 \cdot d$; $c = 1{,}5 \cdot d$; $R = {}^1/_3 \cdot d$; $r = 0{,}2 \cdot d$.

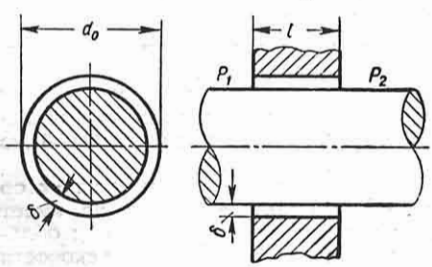
ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ЩЕЛИ

Расход Q через щель определяется формулой

$$Q = \mu f \sqrt{2g \frac{\Delta p}{\gamma}}, \qquad (43)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ — перепад давления в щели; f — проходная площадь щели; μ — коэффициент расхода.

В кольцевых щелях с $\frac{\delta}{d_0} < 0{,}1$ протяженностью $\frac{l}{\delta} > 10$ (фиг. 62) при числах Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{2\delta Q}{\nu f} < 500$ существует ламинарное движение [45]; при этом коэффициент расхода $\mu = C\sqrt{\mathrm{Re}}$, где C зависит от $\frac{l}{\delta}$ (см. таблицу). При $\frac{l}{\delta} \geqslant 120$ можно пользоваться выражением $C = 0{,}144\sqrt{\frac{\delta}{l}}$.

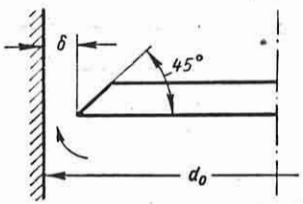


Фиг. 62. Кольцевая щель.

Значения коэффициента $C \cdot 10^2$

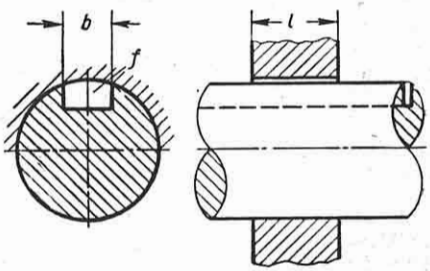
$\frac{l}{\delta}$	20	40	60	80	100	120
100 C	2,3	1,83	1,59	1,43	1,3	1,2

При $\mathrm{Re} > 2000$ коэффициент расхода не зависит от Re и для $\frac{l}{\delta} = 8 \div 20$ имеет величину $\mu = 0{,}62 \div 0{,}7$. Для кольцевой щели по фиг. 63 при $\frac{\delta}{d_0} \leqslant 0{,}15$ и $\mathrm{Re} > 60$ коэффициент расхода $\mu = 0{,}7$ [30].



Фиг. 63.

В прямоугольных (шлицевых) щелях с $l = (1{,}5 \div 2)\,b$ (фиг. 64) ламинарное движение существует при



Фиг. 64. Шлицевая прямоугольная щель.

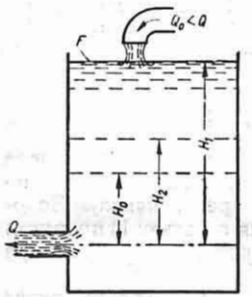
$\mathrm{Re} = \frac{4Q}{\chi\nu} < 150$ (χ — периметр сечения щели); для этой области Re коэффициент расхода $\mu = 0{,}05\sqrt{\mathrm{Re}}$. В области $\mathrm{Re} = 150 \div 1500$ коэффициент $\mu = 0{,}3\sqrt[8]{\mathrm{Re}}$; при $\mathrm{Re} > 1500$ коэффициент расхода не

зависит от Re и имеет величину $\mu = 0{,}8 \div 0{,}66$ для $\frac{f}{b^2} = 0{,}35 \div 0{,}8$ (f — площадь, а b — ширина щели) [45].

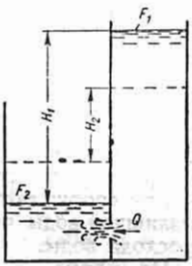
ИСТЕЧЕНИЕ ПОД ПЕРЕМЕННЫМ НАПОРОМ

Если приток $Q_0 = \text{const}$ (фиг. 65) не равен расходу Q из резервуара с ограниченной площадью свободной поверхности F, то напор H и расход Q изменяются со временем, т. е. существует неустановившееся движение.

При соотношении площадей резервуара и отверстия (насадка) $\frac{F}{f} \geqslant 10$ влияние инерционного напора [см. формулу (17)] становится ничтожным [27] и время t изменения уровня в резервуаре с величины H_1 до H_2 можно определять по формуле



Фиг. 65. Истечение под переменным напором.



Фиг. 66. Выравнивание уровней в резервуарах.

$$t = \int_{H_1}^{H_2} \frac{F \cdot dz}{Q_0 - \mu f \sqrt{2gz}}, \qquad (44)$$

где f — площадь отверстия (насадка), через которое происходит истечение из резервуара; μ — коэффициент расхода этого отверстия (насадка); $Q_0 = \text{const}$, $F = \psi(z)$.

Когда $Q_0 < \mu f \sqrt{2gH_1}$, то резервуар опорожняется до уровня

$$H_0 = \frac{Q_0^2}{\mu^2 \cdot f^2 \cdot 2g};$$

если $Q_0 > \mu f \sqrt{2gH_1}$, то резервуар наполняется до уровня H_0. Когда $F = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$, то

$$t = \frac{2F}{\mu f \sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_0} \ln \frac{\sqrt{H_1} - \sqrt{H_0}}{\sqrt{H_2} - \sqrt{H_0}} \right).$$

При $F = \text{const}$ и $Q_0 = 0$

$$t = \frac{2F}{\mu f \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}).$$

Время полного опорожнения ($H_2 = 0$) равно:

$$t = \frac{2F\sqrt{H_1}}{\mu f \sqrt{2g}} = \frac{2FH_1}{\mu f \sqrt{2gH_1}},$$

т. е. оно в два раза больше времени истечения такого же объема жидкости $V = FH_1$ при $H_1 = \text{const}$.

Время t изменения разности уровней H_1 в сообщающихся резервуарах (фиг. 66) до величины H_2 определяется уравнением:

$$t = \frac{1}{f\sqrt{2g}} \cdot \int_{H_2}^{H_1} \frac{F_1 F_2}{\mu (F_1 + F_2)} \cdot \frac{dz}{\sqrt{z}},$$

где F_1 и F_2 — площади сечений резервуаров по свободной поверхности.

При $F_1 = \text{const}$, $F_2 = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$ формула для t принимает следующий вид:

$$t = \frac{2F_1F_2(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{(F_1 + F_2)\mu f \sqrt{2g}}.$$

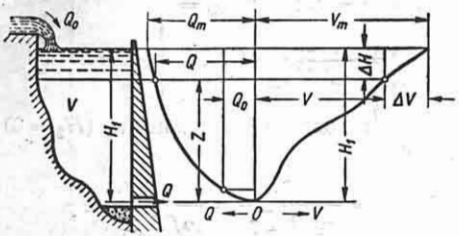
Одинаковый уровень в резервуарах ($H_2 = 0$) установится за время

$$t = \frac{2F_1F_2\sqrt{H_1}}{(F_1 + F_2)\mu f \sqrt{2g}}.$$

Время опорожнения резервуара произвольной формы (водохранилища) можно определять или по формуле (44), или графическим методом, например (фиг. 67), по построенному графику изменения с высотой z объема V резервуара и расхода $Q = \mu f \sqrt{2gz}$ (при $\mu = \text{const}$ или $\mu = var$) с учетом притока Q_0. Задаются интервалом времени Δt и

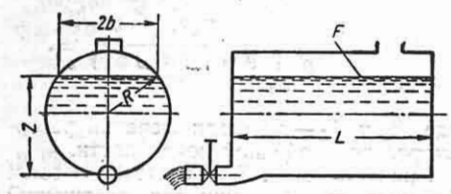
определяют вытекший объем $\Delta V = \Delta t \times (Q_m - Q_0)$ при $H_1 = \text{const}$. Вычитают ΔV из V_m и находят новый уровень z резервуара, для которого повторяют построения с учетом нового Q, соответствующего уровню $z = H_1 - \Delta H$.

Величина $n \cdot \Delta t$, где n — число построений, определит с некоторым приближением время опорожнения резервуара до заданного уровня.



Фиг. 67. Опорожнение резервуара произвольной формы.

Пример. Определить время t опорожнения цилиндрического резервуара (цистерны) с горизонтальной осью, имеющего радиус R, длину L (фиг. 68) и заполненного маловязкой жидкостью. Общий коэффициент сопротивления выходного участка — ζ, коэффициент сжатия струи на выходе $\varepsilon = 1$, выходная площадь f.



Фиг. 68.

Решение. Коэффициент расхода $\mu = \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}$; принимаем его постоянным. Из формулы (44) при $Q_0 = 0$ имеем:

$$t = -\int_{H_1}^{H_2} \frac{F \cdot dz}{\mu f \sqrt{2gH}},$$

где $F = 2bL$, $b = \sqrt{z(2R - z)}$; следовательно,

$$t = \frac{2L}{\mu f \sqrt{2g}} \int_{H_2}^{H_1} (2R - z)^{\frac{1}{2}} \cdot dz.$$

Производим замену: $2R - z = y$, тогда

$$t = \frac{2L}{\mu f \sqrt{2g}} \cdot \frac{2}{3} \cdot \left| y^{\frac{3}{2}} \right|_{y_1}^{y_2},$$

где $y_2 = 2R - H_2$, а $y_1 = 2R - H_1$.

$$t = \frac{4}{3} \frac{L}{\mu f \sqrt{2g}} \left[(2R - H_2)^{\frac{3}{2}} - (2R - H_1)^{\frac{3}{2}} \right].$$

1) Время полного опорожнения цистерны — $H_1 = 2R_1$, $H_2 = 0$:

$$t = \frac{4}{3} \frac{L}{\mu f \sqrt{2g}} \cdot (2R)^{\frac{3}{2}}.$$

2) Время опорожнения 1-й половины объема — $H_1 = 2R$, $H_2 = R$:

$$t = \frac{4}{3} \frac{L}{\mu f \sqrt{2g}} R^{\frac{3}{2}}.$$

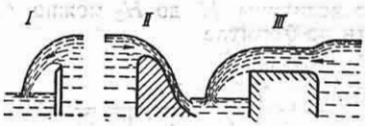
3) Время опорожнения 2-й половины объема — $H_1 = R_1$, $H_2 = 0$:

$$t = \frac{4}{3} \frac{L}{\mu f \sqrt{2g}} \left[(2R)^{\frac{3}{2}} - R^{\frac{3}{2}} \right].$$

ВОДОСЛИВЫ

Водослив — устройство, через которое переливается вода, протекающая по открытому руслу (река, канал). Водосливы сооружаются с целью: 1) пропуска излишней воды через плотину; 2) замера расхода воды.

По форме порога или гребня, через который переливается вода, водосливы разделяются на водосливы с тонкой стенкой (фиг. 69, *I*), водосливы практических профилей (фиг. 69, *II*), водосливы с широким порогом (фиг. 69, *III*).



Фиг. 69. Типы порогов водосливов.

Водослив без бокового сжатия, когда гребень b водослива занимает весь участок B между стенками канала. При $b < B$ — водослив с боковым сжатием (фиг. 70, *I*).

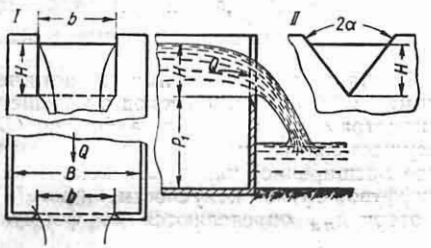
По форме выреза в водосливной стенке, стоящей обычно перпендикулярно к направлению потока, водосливы разделяются на прямоугольные (фиг. 70, *I*), треугольные (фиг. 70, *II*), трапецоидальные и т. д.

Все вышеупомянутые водосливы в свою очередь разделяются на водосливы *неза-*

топленные, когда гребень водослива выше уровня воды за водосливом, и *затопленные*.

Каждый тип водослива обладает своей закономерностью изменения коэффициента расхода в приведенных ниже формулах (45) и (46).

Для точного определения расхода воды в лабораторных условиях применяются незатопленные водосливы с тонкой стенкой (фиг. 70) главным образом



Фиг. 70. Водослив в тонкой стенке, незатопленный.

двух форм: прямоугольные и треугольные.

Расход Q через прямоугольный незатопленный водослив с тонкой стенкой без бокового сжатия определяется формулой

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}}, \qquad (45)$$

где H — высота слоя воды над порогом водослива, замеряемая в месте, где незаметно снижение уровня из-за водослива; b — ширина порога; g — ускорение силы тяжести; m_0 — коэффициент расхода.

Формула Базена для определения m_0 прямоугольного водослива *без бокового сжатия*

$$m_0 = \left(0{,}405 + \frac{0{,}003}{H}\right) \times \left[1 + 0{,}55 \frac{H^2}{(H + p_1)^2}\right],$$

где p_1 (см. фиг. 70) и H — в *м*.

Для прямоугольного незатопленного водослива с тонкой стенкой и *боковым сжатием* расход Q определяется также по формуле (45), но коэффициент расхода m_0 вычисляется по формуле

$$m_0 = \left(0{,}405 + \frac{0{,}0027}{H} - 0{,}03 \frac{B - b}{B}\right) \times \left[1 + 0{,}55 \frac{b^2}{B^2} \cdot \frac{H^2}{(H + p_1)^2}\right],$$

где все линейные размеры — b, B, H и p_1 (см. фиг. 70) берутся в *м*.

Водосливу без бокового сжатия необходимо обеспечить свободный доступ воздуха под переливающуюся струю во избежание прилипания последней к водосливной стенке.

Формула расхода Q через *треугольный* незатопленный водослив в тонкой стенке с углом $2\alpha = 90°$ (фиг. 70, *II*):

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} H^{\frac{5}{2}} = M H^{\frac{5}{2}}, \qquad (46)$$

среднее значение коэффициента расхода $\mu = 0{,}593$ при напорах $H = 0{,}05 \div 0{,}25$ *м*.

Множитель M формулы (46) можно определить по уравнению: $M = \frac{1{,}343}{H^{0{,}03}}$, где H — в *м* [23]; следовательно,

$$Q = 1{,}343 H^{2{,}47}.$$

МЕСТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ

Местные сопротивления вызывают изменение сечения потока или его направления, что сопровождается интенсивным вихреобразованием, резким изменением поля скоростей по сечению потока и обусловливает дополнительные, так называемые местные потери напора $h_{пм}$.

Общепринятая формула для $h_{пм}$:

$$h_{пм} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \qquad (47)$$

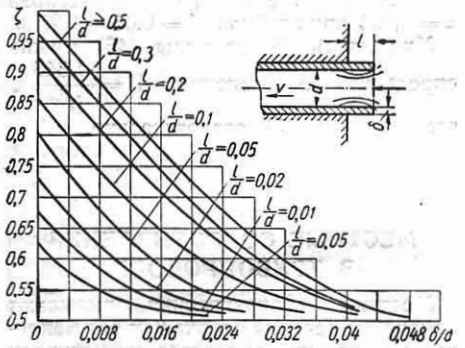
где v — средняя скорость в трубопроводе, обычно за местом потерь; ζ — коэффициент сопротивления, зависящий от геометрической формы местного сопротивления, числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{d \cdot v}{\nu}$, а в некоторых случаях также от шероховатости на участке местного сопротивления и от структуры потока перед местным сопротивлением.

Для $\mathrm{Re} > 1 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^5$ (область обычной эксплуатации трубопроводов с маловязкими жидкостями) величина ζ почти не зависит от Re.

Влияние местных сопротивлений на поле скоростей может распространяться по потоку на значительные расстояния, однако основная величина местных потерь $h_{пм}$ создается на участке $l_0 = (4 \div 5)\, d$

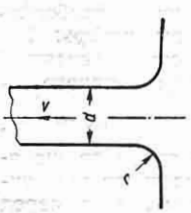
(где d — диаметр трубопровода) за местным сопротивлением. При последовательном расположении местных сопротивлений с интервалами $l \geqslant l_0$ между ними общая величина местных потерь может быть определена, с достаточным для практики приближением, путем суммирования всех отдельных потерь.

Вход в трубу из резервуара. Коэффициент сопротивления ζ для входа в трубу диаметра d, не имеющую закругления, зависит от расстояния l, на которое входит труба внутрь резервуара и от толщины δ стенки трубы (фиг. 71).



Фиг. 71. Коэффициенты сопротивления для незакругленного входа в трубу.

Для тонкостенной трубы с $\delta < 0{,}004d$ при $l \geqslant 0{,}5d$ коэффициент $\zeta = 1$, с последующим уменьшением l он также уменьшается и достигает величины $\zeta = 0{,}5$ при $l = 0$ (конец трубы заподлицо со стенкой резервуара). Для трубы толстостенной или заканчивающейся фланцем ($\delta > 0{,}05d$) величина $\zeta = 0{,}5$, независимо от l [9].



Фиг. 72. Вход в трубу с закруглением по радиусу.

Закругление при входе в трубу значительно снижает потери вследствие уменьшения или полного устранения сжатия потока внутри трубы. При радиусах закругления $r < 0{,}1d$ величина ζ зависит и от того, смыкается ли труба по радиусу r со стенкой резервуара (фиг. 72, табл. 22, случай I), или же труба начинается внутри резервуара на значительном расстоянии от его стенок (табл. 22, случай II). При $r = 0{,}1d$ коэффициент $\zeta \approx 0{,}1$.

Таблица 22

Коэффициенты ζ при скругленном входе в трубу

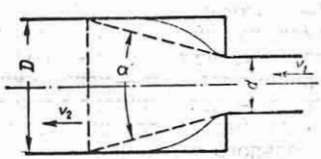
$\frac{r}{d}$	0	0,02	0,04	0,08	0,12	0,16	$\geqslant 0{,}2$
Случай I	0,5	0,37	0,26	0,15	0,09	0,06	0,03
Случай II	1,0	0,74	0,5	0,2	0,1	0,06	0,03

Внезапное расширение и конические диффузоры. Переход с меньшего диаметра d трубопровода на больший (D) осуществляется или внезапно (внезапное расширение) или через конический диффузор с углом конусности α (фиг. 73). Потери $h_{пм}$ определяются по формуле

$$h_{пм} = m\frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} =$$

$$= m\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^2 \frac{v_1^2}{2g}, \qquad (48)$$

где $m\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^2 = \zeta$, см. формулу (47) (с учетом, что $v = v_1$ — средняя скорость в трубопроводе до места потерь).



Фиг. 73. Внезапное расширение, диффузор.

Значения коэффициента m при разных углах конусности приведены ниже [6], однако m в некоторой степени зависит и от $\frac{d}{D}$. Для внезапного расширения ($\alpha = 180°$) величина m близка к единице. При заданном отношении $\frac{d}{D}$ снижение потерь $h_{пм}$ в коническом диффузоре по сравнению с внезапным расширением наступает лишь при $\alpha < 40°$. Особенно невыгодны диффузоры с углами $\alpha = 50 \div 90°$, в интервале которых потери возрастают на 15—20% по сравнению с внезапным расширением.

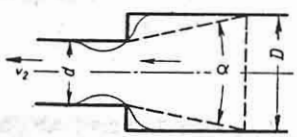
Наименьший коэффициент потерь m имеют диффузоры с углами конусности $\alpha = 5 \div 6°$.

Значения коэффициента m

α	2,5°	5°	7,5°	10°	15°	20°
m	0,18	0,13	0,14	0,16	0,27	0,43
α	25°	30°	40°	60°	90°	180°
m	0,62	0,81	1,03	1,21	1,12	1

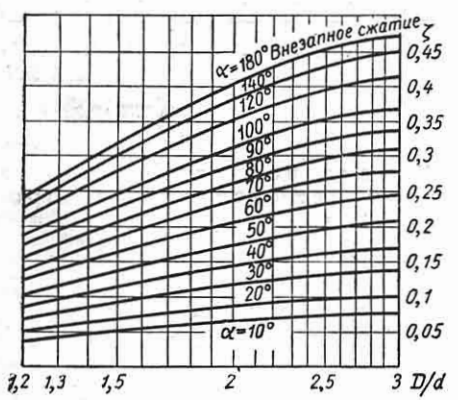
Независимость коэффициента сопротивления $\zeta = m\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^2$ от числа Re при внезапном расширении наступает, когда $\mathrm{Re} = \frac{d \cdot v_1}{\nu} > 5000$ [43].

Внезапное сжатие и конические конфузоры. При внезапном уменьшении диаметра D трубопровода до значения d (внезапное сжатие — фиг. 74)



Фиг. 74. Внезапное сжатие, конфузор.

потери $h_{пм}$ выражают по формуле (47) через скорость v_2 за местом потерь.



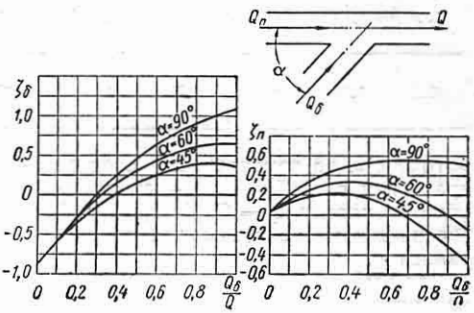
Фиг. 75. Коэффициенты сопротивления для внезапного сжатия и конфузоров.

Коэффициент сопротивления ζ зависит от отношения $\frac{D}{d}$ (см. график для $\alpha = 180°$ на фиг. 75).

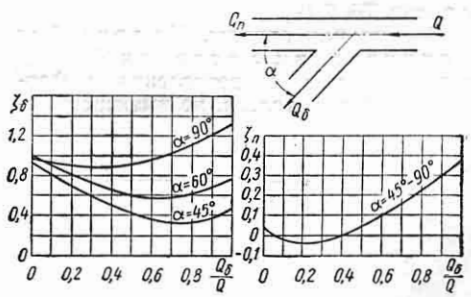
Смыкание труб диаметра D и d через сходящийся конус (конфузор) с углом конусности $\alpha < 180°$ уменьшает коэффициент потерь ζ по сравнению с внезапным сжатием. Ориентировочные величины ζ при различных $\frac{D}{d}$ и $\alpha = \mathrm{const}$ приведены на фиг. 75.

Превращение конфузора в диффузор (изменением направления потока) всегда приводит к увеличению потерь $h_{пм}$.

Тройники. По своей функции тройники разделяются на вытяжные и приточные. В тройниках вытяжных происходит слияние потоков (фиг. 76, *а*), а в приточных — разделение потоков (фиг. 76, *б*).



а)



б)

Фиг. 76. Коэффициенты сопротивления: *а* — вытяжных тройников; *б* — приточных тройников.

Потери в тройниках вычисляются раздельно для каждого ответвления по формулам:

$$h_б = \zeta_б \frac{v^2}{2g} \text{ и } h_п = \zeta_п \frac{v^2}{2g},$$

где $h_б$ — потери удельной энергии потока $Q_б$, идущего по боковому ответвлению; $h_п$ — потери удельной энергии

Таблица 23

$\alpha°$	5°	10°	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
$\zeta_{гл}$	0,016	0,034	0,042	0,066	0,130	0,236	0,471	1,129
$\zeta_{ш}$	0,024	0,044	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	1,265

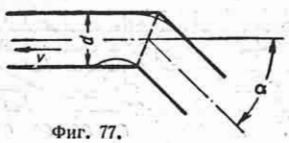
Таблица 24

$\frac{l}{d}$	0	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4	$\geqslant 5$
$\zeta_{гл}$	1,13	0,90	0,67	0,35	0,28	0,30	0,34	0,35	0,38	0,40
$\zeta_{ш}$	1,27	0,95	0,71	0,40	0,37	0,39	0,41	0,44	0,45	0,45

потока $Q_п$, не изменяющего своего направления в тройнике; v — скорость по общему потоку $Q = Q_б + Q_п$; $\zeta_б$ и $\zeta_п$ — соответствующие коэффициенты сопротивления.

Для вытяжных тройников с одинаковой проходной площадью всех сечений коэффициенты $\zeta_б$ и $\zeta_п$ приведены на фиг. 76, *а*, а для тройников приточных — на фиг. 76, *б* [9].

Колена или отводы. Колена без закруглений и вставок (фиг. 77). Коэффициенты сопротивления в формуле (47) для колена, не имеющего закруглений и вставок и изменяющего направление потока в трубе на угол $\alpha = 5 \div 90°$, приведены в табл. 23. Каждому углу α соответствуют два коэффициента сопротивления: 1) $\zeta_{гл}$ — при гладкой внутренней поверхности трубы, 2) $\zeta_{ш}$ — при шероховатой поверхности.



Фиг. 77.

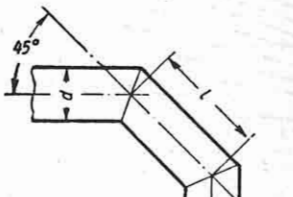
Для стальных и чугунных труб следует брать значения $\zeta_{ш}$, для тянутых труб из цветных металлов (латунь, медь, свинец) можно брать $\zeta_{гл}$.

По коэффициентам ζ табл. 23 определяются только дополнительные потери при изменении направления потока, без потерь на трение. Это замечание справедливо и для табл. 24 и 25.

Таблица 25

$\frac{l}{d}$		1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	$\geqslant 4$
$2l$	$\zeta_{гл}$	0,20	0,16	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18
	$\zeta_{ш}$	0,35	0,31	0,32	0,34	0,35	0,35	0,35
$3l$	$\zeta_{гл}$	0,13	0,12	0,10	0,10	0,11	0,13	0,15
	$\zeta_{ш}$	0,30	0,26	0,28	0,32	0,32	0,32	0,32

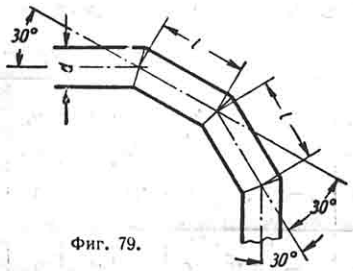
Колена под углом $\alpha = 90°$ с одним симметричным проставком (фиг. 78). В табл. 24 приведены значения коэффициентов сопроти-



Фиг. 78.

вления для гладких колен ($\zeta_{гл}$) и шероховатых ($\zeta_{ш}$) при различных длинах l соединительного проставка. Наименьшая величина ζ соответствует $l = 1{,}5d$, она на 70—75% меньше ζ колена без проставка.

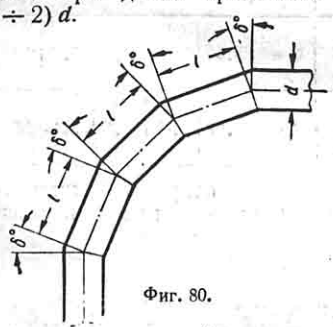
Колена под углом $\alpha = 90°$ с двумя (фиг. 79) и тремя (фиг. 80) симметричными проставками. Табл. 25 определяет величины



Фиг. 79.

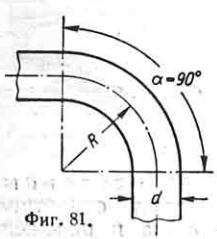
коэффициентов сопротивления колена с углом поворота $\alpha = 90°$ и двумя ($2l$) или тремя ($3l$) проставками из кусков гладкой ($\zeta_{гл}$) или шероховатой ($\zeta_{ш}$) трубы.

Наименьшая величина ζ у таких колен наступает при длине проставков $l = (1{,}5 \div 2)\,d$.

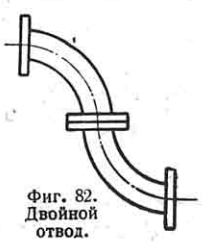


Фиг. 80.

Отводы (колена) с постоянным радиусом поворота (фиг. 81).



Фиг. 81.


Фиг. 82. Двойной отвод.

Значения коэффициента сопротивления при плавном повороте гладкой ($\zeta_{гл}$) или шероховатой ($\zeta_{ш}$) трубы на угол

Таблица 26

$\frac{R}{d}$	1	2	4	6	10
$\zeta_{гл}$	0,23	0,14	0,10	0,08	0,09
$\zeta_{ш}$	0,51	0,30	0,23	0,18	0,20

$\alpha = 90°$ приведены в табл. 26. Коэффициент ζ этой таблицы не включает потери на трение и возможные добавочные потери, если отвод (колено) имеет разъемное соединение с трубой.

Относительное изменение ζ отвода при угле поворота $\alpha \neq 90°$ приведено ниже [31] (коэффициент ζ при $\alpha = 90°$ принят за единицу).

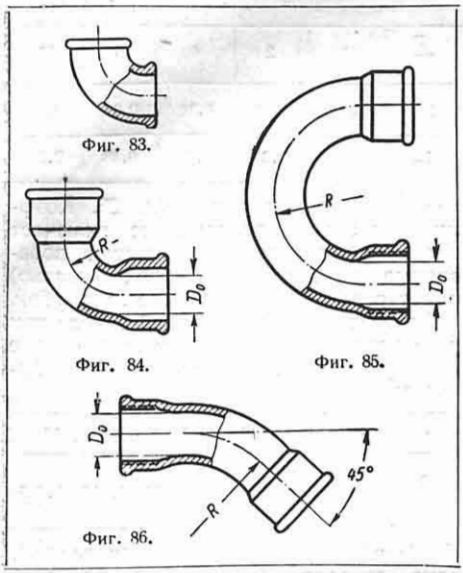
α	45°	60°	90°	120°	135°	180°
$\frac{\zeta}{\zeta_{90}}$	0,627	0,782	1	1,162	1,216	1,408

Общий коэффициент сопротивления ζ_0 двух отводов, соединенных по типу фиг. 82, приближенно определяется равенством $\zeta_0 \approx 4\zeta$, где ζ — коэффициент сопротивления одного отвода с углом поворота $\alpha = 90°$ [31].

Фитинги на резьбе. В табл. 27 приведены значения ζ рыночных фитингов (отводов) с резьбовым соединением для газовых труб с условным диаметром прохода D_0 от 0,5″ до 2″.

Таблица 27

	Угол поворота α		Условный проход D_0			
			0,5″	1″	1,5″	2″
Угольник (фиг. 83)	90°	$\zeta =$	2,2	2	1,2	1,1
Отвод $\frac{R}{D_0} = 1{,}4 \div 1{,}7$ (фиг. 84)	90°	$\zeta =$	1,2	0,8	0,8	0,6
Отвод $\frac{R}{D_0} = 2 \div 2{,}1$ (фиг. 84)	90°	$\zeta =$	0,8	0,5	0,5	0,4
Отвод (фиг. 85)	180°	$\zeta =$	1,2	0,7	0,7	0,6
Отвод (фиг. 86)	45°	$\zeta =$	0,7	0,4	0,3	0,2



Фиг. 83.

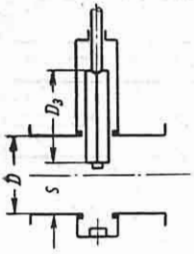
Фиг. 84.

Фиг. 85.

Фиг. 86.

Запорные устройства. Коэффициенты сопротивления ζ, приводимые ниже для отдельных запорных устройств, справедливы для случая, когда за затвором имеется трубопровод длиной $l \geqslant 4d$; при меньших длинах или отсутствии трубопровода за затвором потери возрастают.

1. Задвижки (фиг. 87). 1. Коэффициент сопротивления ζ для определения потерь $h_{пи}$ в задвижке по формуле (47) зависит от степени открытия задвижки—величины $\frac{S}{D}$ и от конструктивных форм клапана задвижки, диаметра $D_з$ и выемки для него в корпусе.



Фиг. 87. Схема задвижки.

В табл. 28 приведены значения ζ для задвижек на трубопровод диаметром D от 25 до 250 *мм*. При полном открытии задвижки $\left(\frac{S}{D}=1\right)$ коэффициент $\zeta > 0$ из-за потерь в выемке корпуса для клапана задвижки.

2. Вентили. Для вентиля запорного обыкновенного (фиг. 88) коэффициенты сопротивления ζ при полном открытии можно определять по следующим данным [44]:

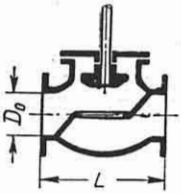
Диаметр трубы D_0 в *мм*	13	19	25	32	38	50	75	100	200
ζ	10,8	6,9	6,1	6,0	5,8	4,6	3,6	4,1	4,7

Возрастание ζ при $D_0 > 75$ *мм* объясняется относительным уменьшением строительной длины L вентиля.

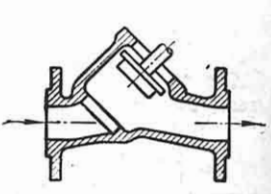
Таблица 28

D в *мм*	$\frac{S}{D}$	1	3/4	1/2	3/8	1/4	1/8
25	$\zeta =$	0,23	0,90	4,1	9,0	32	230
50	$\zeta =$	0,16	0,68	3,0	6,5	20	140
100	$\zeta =$	0,14	0,55	2,6	5,5	16	92
150	$\zeta =$	0,12	0,49	2,4	5,3	14	73
200	$\zeta =$	0,10	0,46	2,3	5,2	13	66
300	$\zeta =$	0,07	0,42	2,2	5,1	12	56

Полностью открытый прямоточный вентиль (фиг. 89) имеет коэффициент сопротивления $\zeta \approx 0{,}5$.



Фиг. 88. Схема вентиля обыкновенного.



Фиг. 89. Схема вентиля прямоточного.

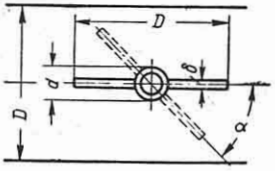
3. Дисковые (дроссельные) затворы. Коэффициент сопротивления ζ дискового затвора в положении полного открытия ($\alpha = 0°$, фиг. 90) зависит от формы клапана затвора.

Для затвора с клапаном в виде плоского диска, толщиной $\delta = 0{,}03D$ с ци-

линдрической втулкой диаметра d величины ζ при $\alpha = 0°$ определяются по следующим данным:

$\frac{d}{D}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
ζ	0,05	0,08	0,12	0,18	0,23	0,33	0,55	1,0

Получившие широкое распространение в трубопроводах большого диаметра дисковые затворы с клапаном, боковая

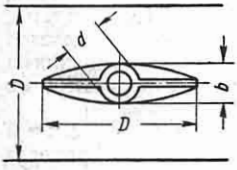


Фиг. 90. Схема дискового затвора с плоским клапаном, снабженным цилиндрической втулкой.

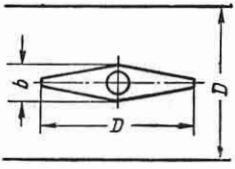
поверхность которого очерчена по сфере (фиг. 91), обладают при $b = d$ и полном открытии следующими коэффициентами сопротивления ζ:

$\frac{b}{D}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
ζ	0,03	0,05	0,07	0,11	0,19	0,33	0,6	1,0

Затвор с плоскоскошенным диском (фиг. 92) является наилучшим по про-



Фиг. 91. Схема дискового затвора с клапаном, имеющим сферическую боковую поверхность.



Фиг. 92. Схема дискового затвора с плоскоскошенным диском.

стоте изготовления и гидродинамическим характеристикам [48]. Коэффициенты ζ затвора этого типа при $\alpha = 0°$:

$\frac{b}{D}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
ζ	0,03	0,04	0,06	0,1	0,15	0,22

Для больших углов закрытия ($\alpha \geqslant 65°$) коэффициент ζ практически не зависит от формы диска и может определяться по следующим данным:

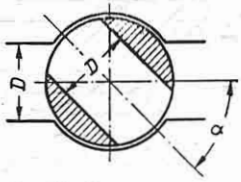
α	65°	70°	75°	80°	85°	90°
ϑ	150	330	950	3600	22 600	∞

При углах закрытия $\alpha < 65°$ каждая форма диска затвора дает свои коэффициенты ζ.

Значения ζ для затвора с плоскоскошенным диском толщиной $b = 0{,}25D$:

α	5°	10°	15°	20°	30°	40°	50°	60°
ζ	0,19	0,36	0,62	1,07	3,05	8,22	24	71,5

4. Затворы конусные (крановые). Коэффициенты сопротивления ζ конусных затворов большого размера (фиг. 93):



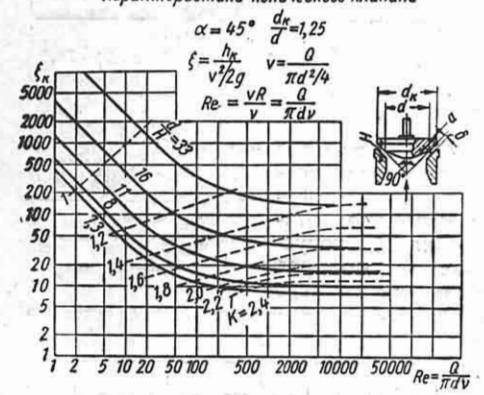
Фиг. 93. Схема конусного затвора.

α	0°	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
ζ	0	0,36	0,9	2,7	7,5	18,2	49,2	151	675

Сопротивление клапана (перепад давления в седле и в камере за клапаном) $h_к = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}$, где $v = \frac{4 \cdot Q}{\pi d^2}$ (d — входной диаметр клапанной щели). Зависимость коэффициента сопротивления ζ от открытия $\frac{H}{d}$ (H — подъем

клапана) и числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{Q}{\pi d \nu}$ дает так называемую универсальную характеристику, представленную для плоского клапана на фиг. 94 и для конического — на фиг. 95 [28]. Расход

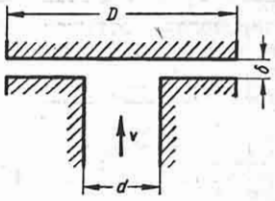
Фиг. 94. Коэффициенты сопротивления для плоского тарельчатого клапана.



Фиг. 95. Коэффициенты сопротивления для конического клапана.

через клапан $Q = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gh_к}$, где $\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}}$. Сопротивление $h_к$ клапана, как правило, не совпадает с номинальной нагрузкой $b = \frac{G+S}{f\cdot\gamma}$ (G — вес клапана, S — усилие пружины, $f = \frac{\pi \cdot d_к^2}{4}$ — площадь клапанной тарелки). Значение $k = \frac{h_к}{b}$ см. на фиг. 94 и 95. Подробнее расчет клапанов по указанным характеристикам см. [28].

Радиально-кольцевая щель (фиг. 96). При ламинарном режиме $Q = \frac{\pi\delta^3}{6\mu} \frac{\Delta p}{\ln \frac{D}{d}}$ (Δp — перепад давления на концах щели). Квадратичный



Фиг. 96. Радиально-кольцевая щель.

режим наступает при значении $\mathrm{Re} = \frac{Q}{2\pi d\nu}$, равном $\mathrm{Re}_{кв} = 5 \cdot \frac{b}{\delta}$, где $b = \frac{D-d}{2}$. Коэффициент сопротивления $\zeta = \frac{2g\cdot\Delta p}{\gamma\cdot v^2}$ $\left(v = \frac{4Q}{\pi d^2}\right)$; при этом режиме для щелей с $\frac{D}{d} \approx 3$ он равен $\zeta \approx 0{,}5 \times \left(\frac{b}{\delta}\right)^{4/3}$ [30].

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В ТРУБАХ

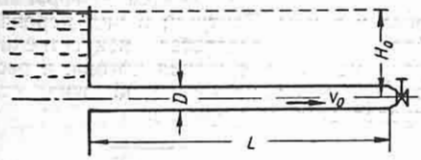
Гидравлический удар — явления, возникающие в трубопроводе при неустановившемся движении жидкости, вызванном быстрым изменением скорости потока (быстрое закрытие и открытие запорных и регулирующих устройств, выключение работающего насоса и т. п.). Гидравлический удар сопровождается резкими колебательными изменениями давления в трубопроводе, затухающими со временем.

Прямой гидравлический удар возникает, когда время процесса регулирования потока трубопровода t_p удовлетворяет условиям:

$$0 \leqslant t_p \leqslant \frac{2L}{a},$$

где L — длина трубопровода от места регулирования (см. фиг. 97); a — скорость распространения ударной волны.

При прямом ударе уменьшение скорости в трубопроводе v_0 в процессе регулирования до величины v_1 вызывает у места регулирования повышение на-



Фиг. 97.

пора ΔH_y (увеличение давления $\Delta p = \Delta H_y \gamma$), определяемое по формуле Н. Е. Жуковского:

$$\Delta H_y = \frac{1}{g}(v_0 - v_1)\, a, \qquad (49)$$

где g — ускорение силы тяжести, a — скорость ударной волны.

Значение a:

$$a = \sqrt{\frac{E_V \cdot g}{\gamma\left(1 + \frac{D}{\delta}\frac{E_V}{E}\right)}} = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta}\frac{E_V}{E}}}, \qquad (50)$$

где E_V — объемный модуль упругости жидкости; γ — удельный вес; E — модуль продольной упругости материала трубопровода; D — внутренний диаметр трубопровода; δ — толщина его стенок; a_0 — скорость распространения звука в жидкости, зависящая как от рода жидкости, так и от ее температуры и давления. Для воды при давлениях $p = 1 \div 25$ *кГ/см²* и температуре $t \approx 10°$ можно брать среднее значение $a_0 = 1435$ *м/сек* [20].

Величины E_V для воды см. в табл. 6.

Средние значения модуля упругости E для различных материалов — см. в томе 3 гл. II „Расчет бруса", табл. 1.

Полное закрытие трубопровода ($v_1 = 0$) при прямом ударе вызывает повышение напора $\Delta H_y = \frac{v_0 a}{g}$.

Формула (49) применима и для случая, когда в процессе регулирования скорость потока в трубопроводе увеличивается от значения $v_0 \geqslant 0$ до v_1; при этом напор у места регулирования понижается на величину ΔH_y.

Непрямой гидравлический удар происходит, когда время процесса регулирования скорости потока в трубопроводе $t_p > \frac{2L}{a}$. В этом случае величина ΔH_{max} изменения напора у места регулирования будет меньше значений ΔH_y, определяемых формулой (49).

Если предположить, что скорость потока изменяется пропорционально времени регулирования, то $\frac{\Delta H_{max}}{\Delta H_y} = \frac{2L}{a \cdot t_p}$.

Величины ΔH изменения напора в конце интервалов времени $\Delta t_i = \frac{2L}{a} \cdot i$ определяются из „цепных" уравнений (51), выведенных в предположении отсутствия потерь на трение в трубопроводе:

$$\Delta H_i + \Delta H_{i-1} = \frac{a}{g}(v_{i-1} - v_i). \qquad (51)$$

Для $i = 0$ скорость потока в трубопроводе v_0, напор перед регулирующим устройством H_0 (величина $\Delta H_0 = 0$).

При постоянстве коэффициента расхода устройства (затвора), регулирующего поток, отношение скоростей в трубопроводе

$$\frac{v_i}{v_0} = \frac{f_i}{f_0}\sqrt{\frac{H_i}{H_0}}, \qquad (52)$$

где $\frac{f_i}{f_0} = i$ — относительное изменение площади прохода потока у регулирующего устройства; H_i — напор в конце интервала времени $\Delta t_i = \frac{2L}{a} i$. (Следовательно, уравнение (52) справедливо для линейного закона изменения проходного сечения трубопровода у места регулирования.)

„Цепные" уравнения в безразмерных величинах имеют вид:

$$h_{i-1} + h_i = 2\rho\,(\tau_{i-1}\sqrt{1 + h_{i-1}} - \tau_i\sqrt{1 + h_i}), \qquad (53)$$

где $h_i = \frac{\Delta H_i}{H_0}$; $\rho = \frac{a \cdot v_0}{2g \cdot H_0}$ — характеристика трубопровода.

Для непрямого гидравлического удара при уменьшении скорости v_0 в трубопроводе до нуля наибольшее увеличение напора ΔH_{max} наступает в конце первой фазы, т. е. при $\Delta t = \frac{2L}{a}$, если

$$\rho < \frac{1}{2}\left[1 + \frac{\sigma}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^2}\right],$$

где

$$\sigma = \frac{L \cdot v_0}{2gH_0 t_p};$$

при этом

$$\sqrt{1 + \frac{\Delta H_{max}}{H_0}} = \sigma - \rho + \sqrt{(\rho - \sigma)^2 + 2\rho + 1},$$

или по упрощенной формуле [20]:

$$\frac{\Delta H_{max}}{H_0} = \frac{2\sigma}{1 + \rho - \sigma}$$

при $\rho < 1$.

Если $\rho > \frac{1}{2}\left[1 + \frac{\sigma}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^2}\right]$, то при уменьшении скорости v_0 до нуля за время $t_p > \frac{2L}{a}$ величина ΔH_{max} соответствует концу закрытия трубопровода и определяется из формулы

$$\sqrt{1 + \frac{\Delta H_{max}}{H_0}} = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^2},$$

или приближенно:

$$\frac{\Delta H_{max}}{H_0} = \frac{2\sigma}{2 - \sigma} \text{ при } \rho > 1.$$

Наибольшее понижение напора ΔH_{min} в процессе открытия регулировочных устройств (при изменении скорости в трубопроводе от $v = 0$ до v_0 за время $t_p > \frac{2L}{a}$) может также наступить или в конце первой фазы, или в конце полного открытия. В первом случае величина ΔH_{min} определится приближенной формулой

$$\frac{\Delta H_{min}}{H_0} = -\frac{2\sigma}{1 + \sigma + \rho} \text{ при } \rho < 1;$$

для второго случая упрощенная формула имеет вид:

$$\frac{\Delta H_{min}}{H_0} = -\frac{2\sigma}{2 + \sigma} \text{ при } \rho > 1.$$

Существуют также и графические методы совместного решения уравнений (51) и (52), см. например [14].

РАСХОДОМЕРЫ ПОТОКОВ В ТРУБОПРОВОДАХ

Расходомеры, основанные на создании перепада давления. К расходомерам этого типа относятся диафрагмы, сопла и трубы Вентури; в них перепад давления Δp создается искусственно путем местного сужения потока, а расход Q *м³/сек* несжимаемой жидкости определяется по формуле:

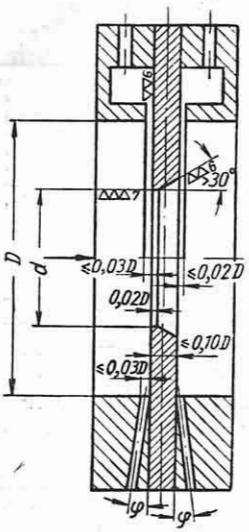
$$Q = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2g\frac{\Delta p}{\gamma}}. \qquad (54)$$

Здесь F_0 — проходная площадь расходомера в месте сужения (по наименьшему диаметру d); α — коэффициент расхода, зависящий от конструктивной формы расходомера, величины $m = \frac{F_0}{F} = \left(\frac{d}{D}\right)^2$, где D — диаметр трубопровода, а также и от числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{4Q}{\pi D \nu}$ (ν — кинематический коэффициент вязкости), если $\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{пред}$; γ — удельный вес протекающей жидкости; Δp — перепад давления, определяемый обычно дифманометром.

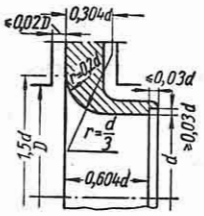
При замере перепада давления Δp в капельной жидкости малое даление p_2 в суженном месте расходомера должно быть выше $p_{н.п}$ — давления насыщенных паров жидкости при данной температуре (см. гл. I, табл. 11, стр. 65).

Нормальная диафрагма (фиг. 98) применяется в трубопроводах с $D > 50$ *мм*. Отбор давлений p_1 и p_2 ($\Delta p = p_1 - p_2$) осуществляется непосредственно у диафрагмы — по обе стороны ее — одним из двух способов, изображенных на фиг. 98. Диафрагмы ставят на прямолинейном участке трубопровода так, чтобы длина трубы до диафрагмы $l_1 \geqslant (10 \div 40)\,D$ (чем больше отношение $\frac{d}{D}$, тем больше и l_1), а длина прямой трубы за диафрагмой $l_2 \geqslant 5D$ (подробнее об этом см. в инструкции [49]).

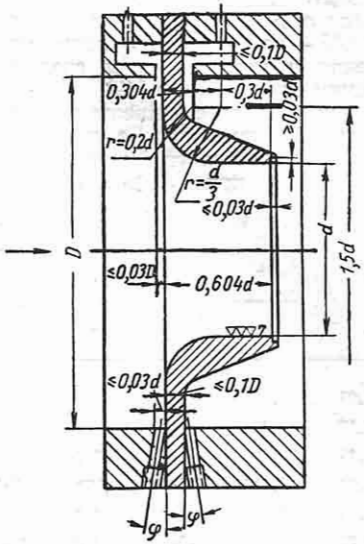
Зависимости коэффициентов расхода α нормальных диафрагм от числа Re при различных $m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$ даны на фиг. 99, а значения α при $\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{пред}$ приведены в табл. 29. Существуют поправки α на шероховатость трубы и недостаточную остроту входной кромки диафрагмы [49].



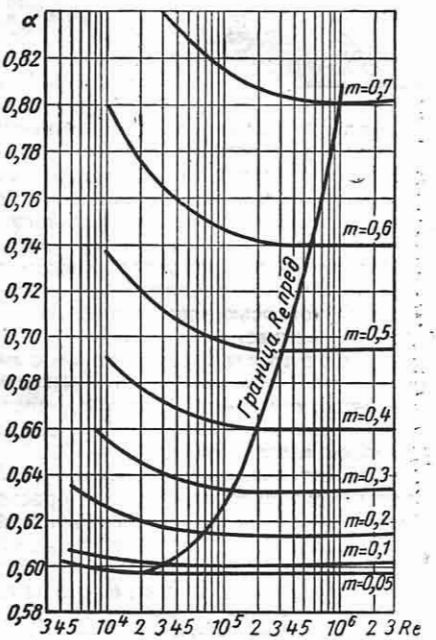
Фиг. 98. Нормальная диафрагма.



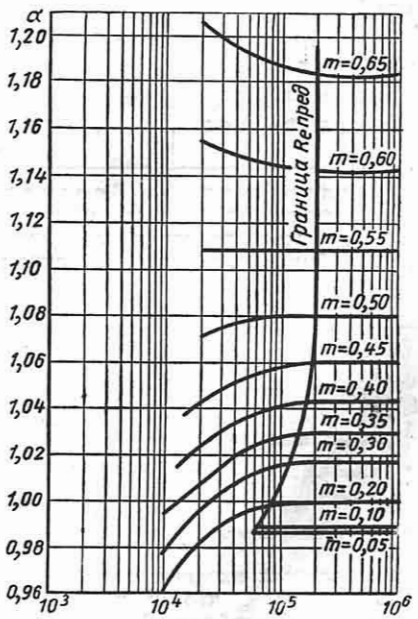
Фиг. 100. Нормальное сопло при $m > 0,45$.



Фиг. 101. Нормальное сопло при $m \leqslant 0,45$.



Фиг. 99. Коэффициенты расхода для нормальных диафрагм.



Фиг. 102. Коэффициенты расхода нормальных сопел.

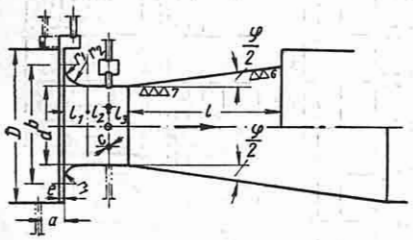
Нормальное сопло применяется при $D \geqslant 50$ *мм* и $d \geqslant 20$ *мм*; его чертеж для $m > 0{,}45$ см. на фиг. 100, а для $m \leqslant 0{,}45$ — на фиг. 101. Условия отбора давления и монтажа сопел аналогичны условиям для диафрагм [49].

Зависимость коэффициентов расхода α нормальных сопел от Re при различных m выражается графиками фиг. 102; величины α при $\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{пред}$ даны в табл. 29.

Таблица 29

$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	Диафрагма		Сопло	
	α	$\mathrm{Re}_{пред}$	α	$\mathrm{Re}_{пред}$
0,05	0,598	$2{,}8 \cdot 10^4$	0,987	$6 \cdot 10^4$
0,10	0,602	$3{,}6 \cdot 10^4$	0,989	$6{,}3 \cdot 10^4$
0,15	0,608		0,997	
0,20	0,615	$7{,}5 \cdot 10^4$	0,999	$9 \cdot 10^4$
0,25	0,624		1,007	
0,30	0,634	$13{,}5 \cdot 10^4$	1,017	$12 \cdot 10^4$
0,35	0,645		1,029	
0,40	0,650	$20 \cdot 10^4$	1,043	$16{,}5 \cdot 10^4$
0,45	0,660		1,060	
0,50	0,695	$33 \cdot 10^4$	1,081	$20 \cdot 10^4$
0,55	0,716		1,108	
0,60	0,740	$53 \cdot 10^4$	1,142	$20 \cdot 10^4$
0,65	0,768		1,183	
0,70	0,802	$110 \cdot 10^4$		

Нормальная труба Вентури по своей длине может быть обычной (фиг. 103, нижняя половина) или укороченной (фиг. 103, верхняя половина);



Фиг. 103. Схема нормальной трубы Вентури.

в обоих случаях входная часть имеет тот же профиль, что и нормальное сопло; применяется при $D \geqslant 50$ *мм* и $d \geqslant 20$ *мм* в интервале: $0{,}05 \leqslant m \leqslant 0{,}6$.

Коэффициенты расхода α при $\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{пред}$ определяются табл. 30.

Таблица 30

$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	α	$\mathrm{Re}_{пред}$
0,05	0,987	$7 \cdot 10^4$
0,10	0,989	$7{,}7 \cdot 10^4$
0,20	1,000	$9{,}5 \cdot 10^4$
0,30	1,018	$14 \cdot 10^4$
0,40	1,043	$17 \cdot 10^4$
0,50	1,085	$20 \cdot 10^4$
0,60	1,135	$20 \cdot 10^4$

Относительные величины потерянного напора $h_{пм}$ (в долях перепада давления Δp) при $\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{пред}$ для нормальных диафрагм, сопел и труб Вентури приведены в табл. 31.

Таблица 31

Величины $\frac{h_{пм}}{\Delta p}$ в %

$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	Диафрагма	Сопло	Труба Вентури
0,1	88	83	17
0,2	78	66	13
0,3	68	52	10
0,4	57	39	8
0,5	46	28	8
0,6	36	—	—

Механические расходомеры-счетчики. Этими приборами регистрируется общее количество жидкости в объемных или весовых единицах, прошедшее через прибор с момента первоначального отсчета его показаний.

Механические счетчики можно разделить на три группы: скоростные с нормальной осью, скоростные аксиальные, объемные.

Скоростные счетчики с нормальной осью (фиг. 104) имеют рабочий орган — крыльчатку, вращаемую потоком жидкости вокруг оси, нормальной к оси трубопровода.

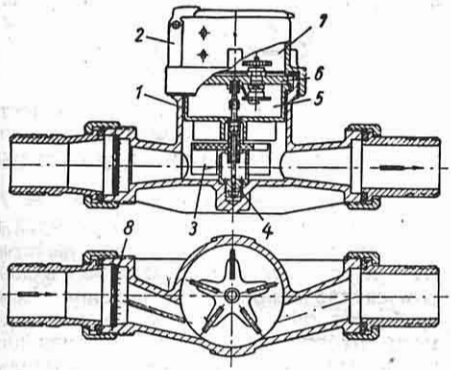
Относительная пропускная способность механических счетчиков-расходомеров определяется величиной так называемого характерного расхода Q_0 *м*^{3}/*час*, при котором потери напора в расходомере равны 10 *м* столба воды. Каждый расходомер-счетчик имеет свои эксплуатационные пределы по наименьшим (Q_{min}) и наибольшим (Q_{max}) расходам, обусловленные допустимой точностью показаний расходомера ($\pm 2\%$ для ско-

ростных счетчиков). В табл. 32 приведены данные по Q_0, Q_{min} и Q_{max} для скоростных счетчиков с нормальной

Таблица 32

Калибр $d_к$ в *мм*	Q_0 в *м³/час*	Q_{min} в *м³/час*	Q_{max} в *м³/час*
15	3	0,1	1,5
20	5	0,15	2,5
25	7	0,18	3,5
30	10	0,25	5,0
40	20	0,5	10,0

осью, применение которых ограничивается трубопроводами с $d = d_к = 15 \div 40$ *мм*.

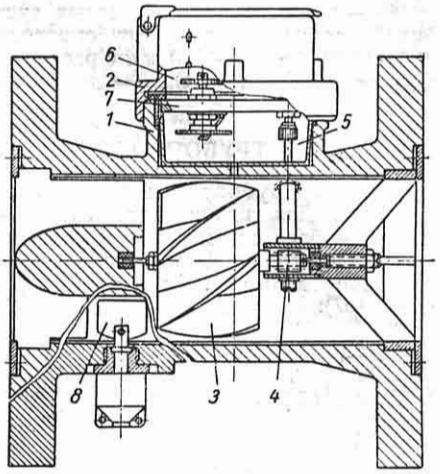


Фиг. 104. Схема расходомера-счетчика с нормальной осью: *1* — корпус; *2* — головка; *3* — крыльчатка; *4* — шип; *5* — передаточный механизм (редуктор); *6*— герметичная перегородка; *7* — счетный механизм; *8* — сетка (фильтр).

Скоростные аксиальные счетчики (фиг. 105) применяются в трубопроводах с $d = d_к = 50 \div 300$ *мм*; в счетчиках этого типа ось вращения рабочего органа — винтовой крыльчатки — совпадает с осью трубопровода. Характерные расходы Q_0, верхний (Q_{max}) и нижний (Q_{min}) пределы эксплуатационных расходов аксиальных счетчиков приводятся в табл. 33.

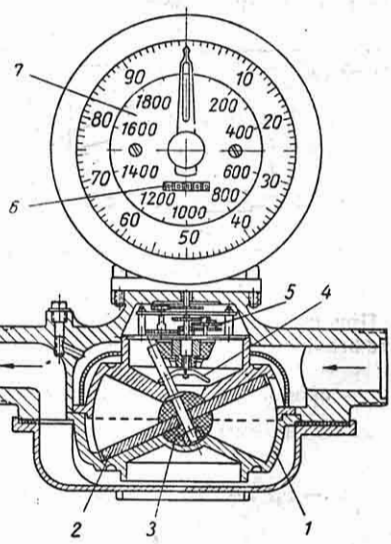
Таблица 33

Калибр $d_к$ в *мм*	Q_0 в *м³/час*	Q_{max} в *м³/час*	Q_{min} в *м³/час*
50	70	22	3
80	250	80	6
100	440	140	8
150	1000	320	12
200	1700	550	18
250	2600	820	32
300	4000	1300	60



Фиг. 105. Схема аксиального расходомера-счетчика: *1* — корпус; *2* — головка; *3* — винтовая вертушка; *4* — червячная пара; *5* — передаточный механизм (редуктор); *6* — счетный механизм; *7* — герметичная перегородка; *8* — поворотная пластина-регулятор.

Объемные счетчики-расходомеры бывают различных типов: дисковые (фиг. 106), с кольцевым порш-



Фиг. 106. Схема дискового расходомера-счетчика: *1* — измерительная камера; *2* — дисковый поршень; *3* — полушария поршня; *4* — поводок приводного валика; *5* — передаточный механизм; *6* — роликовый счетный механизм; *7* — счетный механизм со стрелкой.

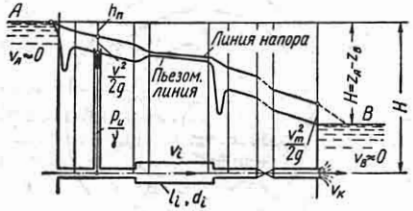
нем, с овальными телами вытеснения и др. [22]; погрешность их показаний $\pm 1\%$ — выше, чем у скоростных счетчиков; применяются в трубопроводах диаметром $d = 12 \div 250$ *мм* с расходами $Q_{min} = 0{,}01$ *м³/час* и $Q_{max} = 250$ *м³/час*.

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

Простой трубопровод (без ответвлений). Для трубопровода, соединяющего два бака с постоянными уровнями и состоящего из k последовательных участков длины l_i и диаметра d_i (фиг. 107):

$$H = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g} + \sum_{i=1}^{k} \zeta_i \frac{v_i^2}{2g} + \alpha \frac{v_к^2}{2g}, \quad (55)$$

где $H = z_A - z_B$ — разность уровней (вообще, гидростатических напоров) в баках; λ_i и ζ_i — коэффициент сопротивления трения и сумма коэффициентов местных сопротивлений в каждом участке; $v_к$ — скорость выхода из трубопровода (скоростной напор $\alpha \dfrac{v_к^2}{2g}$ — потеря выхода; для турбулентного режима $\alpha \approx 1$).



Фиг. 107. График уравнения Бернулли для простого трубопровода.

При истечении в атмосферу напор H отсчитывается от выходного сечения и $\dfrac{v_к^2}{2g}$ — скоростной напор струи на выходе из системы. По уравнению расхода

$$Q = v_i F_i = \text{const}, \quad v_i = \frac{F_к}{F_i} \cdot v_к$$

и

$$H = \frac{v_k^2}{2g} \left[1 + \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \left(\frac{F_к}{F_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^{k} \zeta_i \left(\frac{F_к}{F_i} \right)^2 \right]$$

или

$$H = \frac{v_к^2}{2g} \cdot (1 + \zeta_c)$$

и

$$Q = \mu_c F_к \sqrt{2g \cdot H},$$

где ζ_c — коэффициент сопротивления и $\mu_c = \dfrac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}}$ — коэффициент расхода трубопровода.

Для трубопровода постоянного диаметра

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right)$$

и

$$\zeta_c = \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta.$$

Суммирование ζ допустимо, если местные сопротивления разделены стабилизирующими участками трубопровода $l \geqslant 5d$.

Если задача расчета — определить H по заданным размерам трубопровода и расходу, коэффициенты потерь выбираются в соответствии с известной в данном случае зоной сопротивления. Если требуется определить расход или диаметр трубопровода (зона сопротивления неизвестна), расчет ведут последовательными приближениями, исходя из ориентировочно выбранных значений коэффициентов потерь.

Эквивалентная длина местного сопротивления — длина трубопровода, на которой потери трения равны при одинаковом расходе потере в местном сопротивлении: $l_э = \dfrac{\zeta}{\lambda} \cdot d$. Введение $l_э$ заменяет каждый участок трубой без местных сопротивлений, с приведенной длиной $L_i = l_i + l_{эi}$. Система последовательных участков длиной L_i и диаметра d_i может быть приведена к трубе постоянного диаметра путем замены каждого участка эквивалентной ему по сопротивлению трубой диаметра $d_э$ и эквивалентной длины

$$L_{эi} = L_i \left(\frac{d_э}{d_i} \right)^n.$$

При ламинарном режиме $n = 4$, при турбулентном режиме в области гладкого трения $n = 4{,}75$, в квадра-

тичной области $n \approx 5{,}25 \div 5{,}3$. Приближенно при турбулентном режиме

$$L_{эi} = L_i \left(\frac{d_э}{d_i}\right)^5.$$

Для полученного путем таких замен эквивалентного трубопровода с постоянным диаметром $d_э$ и приведенной длиной $L = \sum_{i=1}^{k} L_{эi}$ расчетная зависимость

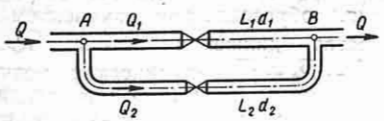
$$H = 0{,}0827\lambda \frac{LQ^2}{d_э^5}.$$

Трубопровод с транзитным расходом Q_T и равномерным отбором по его длине путевого расхода $Q_п$ рассчитывается по эквивалентному расходу

$$Q = \sqrt{Q_T^2 + \frac{1}{3}Q_п^2 + Q_T \cdot Q_п}$$

Определение экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода см. [5], [12].

Трубопровод с параллельными ветвями. Предпосылки расчета: 1) В параллельных ветвях потери напора между узловыми точками (A и B на фиг. 108) одинаковы: $h_{п_{AB}} = h_{п_1} = h_{п_2} = h_{п_i}$. 2) Расход жидкости, притекающей к узловой



Фиг. 108. Трубопровод с параллельными ветвями.

точке, равен расходу оттекающей от нее жидкости; отсюда — сумма расходов в параллельных ветвях равна расходу в неразветвленных участках, примыкающих к узлам:

$$Q = Q_1 + Q_2 = \sum_{i=1}^{k} Q_i.$$

Распределение расхода между двумя параллельными ветвями:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{d_2^n}{d_1^n} \cdot \frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{1}{m}}.$$

При ламинарном режиме $n = 4$, $m = 1$; при турбулентном режиме в области гладкого трения $n = 4{,}75$; $m = 1{,}75$; в квадратичной области $n \approx 5{,}25 \div 5.3$ и $m = 2$, или приближенно (принимая, что λ в обеих ветвях одинаков и, следовательно, $n = 5$):

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{2{,}5} \cdot \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{0{,}5}.$$

Систему с параллельными ветвями можно рассчитать, приведя ее к простому трубопроводу путем замены параллельных ветвей эквивалентной трубой. Для k ветвей приведенной длины L_i и диаметра d_i размеры эквивалентной трубы определяются соотношением

$$\left(\frac{d_э^n}{L_э}\right)^{\frac{1}{m}} = \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{d_i^n}{L_i}\right)^{\frac{1}{m}}.$$

В квадратичной области приближенно

$$\left(\frac{d_э^5}{L_э}\right)^{0{,}5} = \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{d_i^5}{L_i}\right)^{0{,}5}.$$

Обычно задают $d_э$ (равным диаметру магистрали), определяя $L_э$. Для одинаковых ветвей длины L и диаметра d при $d_э = d$, $L_э = \frac{L}{k^m}$, где k — число ветвей; при ламинарном режиме $L_э = \frac{L}{k}$, в квадратичной области $L_э = \frac{L}{k^2}$.

Добавление параллельной ветви к простому трубопроводу увеличивает расход в отношении

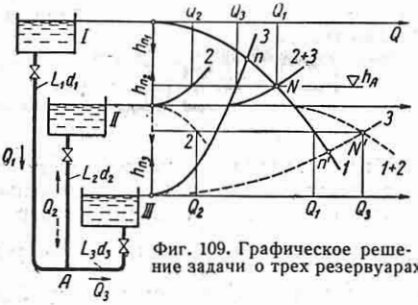
$$\frac{Q_1'}{Q_1} = \frac{1}{\left\{1 - \frac{L_1}{L}\left[1 - \frac{d_1^n}{\left(d_1^{\frac{n}{m}} + d_2^{\frac{n}{m}}\right)^m}\right]\right\}^{\frac{1}{m}}},$$

где L и d_1 — полная длина и диаметр трубопровода, $L_1 = L_2$ — длина разветвленного участка и d_2 — диаметр параллельной ветви. При $d_2 = d_1$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1}{\left[1 - \frac{L_1}{L}\left(1 - \frac{1}{2^m}\right)\right]^{\frac{1}{m}}}.$$

Для квадратичной области в этом случае $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{3}{4}\frac{L_1}{L}}}$.

Трубопровод с тупиковыми разветвлениями. Методы расчета выясняются на типичной схеме, состоящей из трех ветвей, которые связаны с баками на различных уровнях и смыкаются в общей узловой точке (задача о трех резервуарах). Графические методы основаны на использовании характеристик ветвей — зависимости суммарной потери напора от расхода: $h_n = 0{,}0827\lambda \frac{LQ^2}{d^5}$ (L — приведенная длина ветви). При ламинарном режиме характеристика прямолинейна, при турбулентном — близка к квадратичной параболе. При графическом решении задачи о трех резервуарах (фиг. 109) характеристики ветвей строят-



Фиг. 109. Графическое решение задачи о трех резервуарах.

ся в координатах $Q - h_n$ от уровней соответствующих баков. Для баков, питающих систему, характеристики ветвей строятся вниз, для баков, получающих жидкость из системы, — вверх. Точка встречи характеристик *1* и *3* определяет условия работы бака *II* (точка встречи *n* выше уровня бака *II*,— последний получает жидкость; точка встречи *n'* ниже уровня — бак *II* питает систему). В первом случае характеристика *2* строится вверх; ее суммирование по расходам с характеристикой *3* дает кривую (*2* + *3*) общего расхода, получаемого баками *II* и *III*. Точка *N* встречи последней кривой с характеристикой *1* определяет режим системы — расходы в ветвях Q_1, Q_2, Q_3 и пьезометрический уровень h_A в узловой точке. Режиму системы, когда бак *II* является питателем, отвечает точка *N'*.

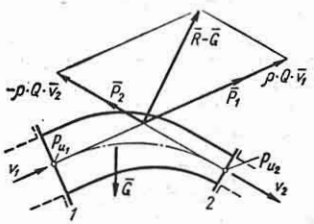
Методы расчета разветвленных трубопроводов подробнее см. [1], [5], [17].

СИЛА ДЕЙСТВИЯ ПОТОКА НА ГРАНИЧНЫЕ СТЕНКИ

Неподвижные стенки. При установившемся движении сила действия (реакция) потока на стенки канала выражается векторным равенством

$$\overline{R} = \rho Q (\overline{v}_1 - \overline{v}_2) + \overline{P}_1 + \overline{P}_2 + \overline{G}, \quad (56)$$

где Q — расход; ρ — плотность жидкости; $\overline{v}_1$ и $\overline{v}_2$ — средние скорости во входном



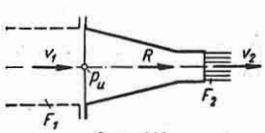
Фиг. 110. Определение силы действия потока на стенки канала.

и выходном сечениях; $\overline{P}_1$ и $\overline{P}_2$ — силы от избыточного давления жидкости в этих сечениях ($P = p_u \cdot F$, p_u — избыточное давление и F — площадь сечения); $\overline{G}$ — вес жидкости в канале между входным и выходным сечениями.

$\overline{R}_\partial = \rho Q (\overline{v}_1 - \overline{v}_2)$ — динамическая реакция, обусловленная изменением количества движения потока; $\overline{R}_{cm} = \overline{P}_1 + \overline{P}_2 + \overline{G}$ — статическая реакция. Уравнение применимо к турбулентному потоку, удовлетворяющему во входном и выходном сечениях условию плавной изменяемости (малая кривизна линий тока и малые углы между ними). Силу $\overline{R}$ можно определять геометрически (фиг. 110) или проектированием ее слагающих на координатные оси.

Примеры. 1. Сходящийся насадок с выходом в атмосферу, без учета G (фиг. 111):

$$R = p_u \cdot F_1 - \rho Q (v_2 - v_1)$$



Фиг. 111.

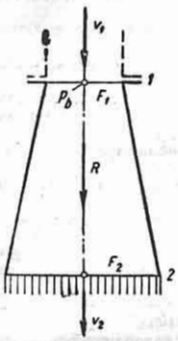
или, пренебрегая сопротивлением насадка,

$$R = \rho \frac{Q^2}{F_2} \cdot \frac{(1-m)^2}{2m}, \text{ где } m = \frac{F_2}{F_1}.$$

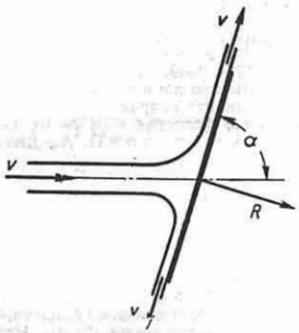
2. Вертикальный диффузор с выходом в атмосферу (фиг. 112):

$$R = \rho Q (v_1 - v_2) - p_в \cdot F_1 + G,$$

где $p_в$ — вакуум во входном сечении.



Фиг. 112.



Фиг. 113.

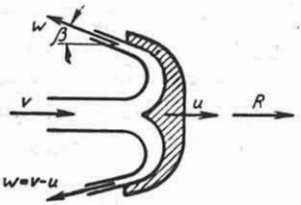
Сила действия свободной струи на плоскую стенку, диаметр которой больше пяти диаметров струи (фиг. 113), если пренебречь G и силами трения, равна по уравнению (56)

$$R = R_д = \rho Q v \sin \alpha,$$

при условии, что стенка нормальна к струе $R = \rho Q v$. Сила увеличивается, если криволинейная стенка отклоняет сходящую с нее струю назад (фиг. 114):

$$R = \rho \cdot Q v (1 + \cos \beta);$$

при $\beta = 0$ (стенка отклоняет струю на 180°) сила удваивается.



Фиг. 114.

Подвижные стенки. При прямолинейном поступательном движении стенок с постоянной переносной скоростью u сила R находится из уравнения (56), в котором динамическая реакция определяется секундным изменением количества движения потока в относительном движении: $R_д = \rho Q_w (\overline{w}_1 - \overline{w}_2)$ (w — относительная скорость, $Q_w = w \cdot F$). При натекании свободной струи, абсолютная скорость которой v и площадь F, на стенку, движущуюся с постоянной, поступательной скоростью u (фиг. 114), относительный расход $Q_w = F(v - u)$ и реакция (без учета потерь):

$$R = \rho F (v - u)^2 (1 + \cos \beta) =$$

$$= \rho Q v \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 (1 + \cos \beta),$$

где $Q = vF$.

Получаемая при этом механическая мощность равна $N = R \cdot u$, и теоретический к. п. д. процесса преобразования кинетической энергии струи в полезную механическую работу

$$\eta = \frac{N}{\gamma Q \frac{v^2}{2g}} = 2 \frac{u}{v} \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 (1 + \cos \beta)$$

Максимальное значение к. п. д. $\eta_{max} = \frac{8}{27} (1 + \cos \beta)$ имеет место при $\frac{u}{v} = \frac{1}{3}$.

При использовании всего расхода струи Q применением ряда следующих друг за другом лопаток (рабочее колесо активной турбины)

$$R = \rho Q (w_1 - w_2) =$$

$$= \rho Q v \left(1 - \frac{u}{v}\right) (1 + \cos \beta);$$

теоретический к. п. д. процесса

$$\eta = 2 \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{u}{v} (1 + \cos \beta)$$

и

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad \text{при} \quad \frac{u}{v} = \frac{1}{2}.$$

При установившемся движении жидкости в равномерно вращающихся каналах динамический момент действия потока на стенки относительно оси их вращения

$$M = \rho \cdot Q (r_1 \cdot v_1 \cos \alpha_1 - r_2 \cdot v_2 \cos \alpha_2),$$

где r — радиус вращения; v — абсолютная скорость; α — угол между векторами абсолютной v и переносной (окружной) скорости u соответственно на входе и на выходе из канала (см. фиг. 35). При $M > 0$ момент потока направлен в сторону вращения канала (турбина), при $M < 0$ — против вращения (насос). В схеме на фиг. 36 $M = -\rho \cdot Q \cdot r^2 \omega$, где Q — расход через трубку при ее вращении.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Абрамов Н. Н., Расчет водопроводных сетей, Стройиздат, 1952.
2. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т. и Пикалов Ф. И., Гидравлика, Госэнергоиздат, 1950.
3. Альтшуль А. Д., Истечение из отверстия жидкостей с повышенной вязкостью, „Нефтяное хозяйство" № 2, 1950.
4. Бриджмен П., Физика высоких давлений, ОНТИ, 1935.
5. Гениев Н. Н., Абрамов Н. Н., Павлов В. И., Водоснабжение, Стройиздат, 1950.
6. Гибсон А., Гидравлика и ее приложения, Госэнергоиздат, 1934.
7. Евреинов В. Н., Гидравлика, Речиздат, 1947.
8. Жоховский М. К., Техника измерения давления и разрежения, Машгиз, 1952.
9. Идельчик И. Е. Гидравлические сопротивления, Госэнергоиздат, 1954.
10. Киселев П. Г., Справочник по гидравлическим расчетам, Госэнергоиздат, 1950.
11. Конаков П. К., Новая формула для коэффициента сопротивления гладких труб, ДАН СССР, Новая серия, т. I, № 7, 1946.
12. Копьев С. Ф., Теплоснабжение, Стройиздат, 1953.
13. Кузнецов Д. С., Гидродинамика, Гидрометеорологиздат, 1951.
14. Куколевский И. И., Гидравлический удар в простом трубопроводе, МВТУ, „Гидромашиностроение" № 5, Машгиз, 1948.
15. Кусаков М. М., Методы определения физико-химических характеристик нефтяных продуктов, ОНТИ, 1936.
16. Лейбензон Л. С., Руководство по нефтепромысловой механике, ч. 1, ОНТИ, 1931.
17. Лобачев В. Г., Приемы расчета водопроводных сетей, Министерство коммунального хозяйства, 1950.
18. Лобачев В. Г., Противопожарное водоснабжение. Министерство коммунального хозяйства, 1950.
19. Мельников С. М., Ртуть, Металлургиздат, 1951.
20. Мостков М. А. и Башкиров А. А., Расчеты гидравлического удара, Госэнергоиздат, 1952.
21. Мурин Г. А., Гидравлическое сопротивление стальных труб, Известия ВТИ № 10, 1948.
22. Павловский Н. Н., Измерение расхода и количества жидкостей, газов и пара, Машгиз, 1951.
23. Павловский Н. Н., Гидравлический справочник, ОНТИ, 1937.
24. Павловский Н. Н., Краткий гидравлический справочник, Стройиздат, 1940.
25. Панченков Г. М., Теория вязкости жидкости, Гостоптехиздат, 1947.
26. Петров Н. П., Гидродинамическая теория смазки, АН СССР, 1948.
27. Пономарев С. Д., Истечение через отверстия при переменном напоре, Вестник инж. и техн. № 3, 1941.
28. Попов К. Н., Статические исследования насосных клапанов на жидкостях различной вязкости, МВТУ, 1949.
29. Преображенский В. П., Теплотехнические измерения и приборы, Госэнергоиздат, 1953.
30. Рождественский С. Н., Гидравлические предохранительные клапаны, МВТУ, 1952.
31. Рихтер Г., Гидравлика трубопроводов, ОНТИ, 1936.
32. Терг С. М., Основные задачи теории ламинарных течений, ГТТИ, 1951.
33. Фабрикант Н. Я., Аэродинамика, ч. I, ГТТИ, 1949.
34. Филоненко Г. К., Формула для коэффициента гидравлического сопротивления гладких труб, Известия ВТИ № 10, 1948.
35. Филонов П. А., Движение нефти по трубам, Нефтьиздат, 1929.
36. Флятау Р. С., Гидравлические расчеты трубопроводов, Гостоптехиздат, 1949.
37. Френкель Н. З., Гидравлика, Госэнергоиздат, 1947.
38. Френкель Н. З., Основы гидравлических расчетов при проектировании и эксплуатации нефтебаз, Гостоптехиздат, 1951.
39. Хаймович Е. М., Гидроприводы и гидроавтоматика станков, Машгиз, 1953.
40. Шевелев Ф. А., Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах, Стройиздат, 1953.
41. Шевелев Ф. А., Таблицы для гидравлического расчета стальных и чугунных водопроводных труб, Стройиздат, 1953.
42. Шиллер Л., Движение жидкостей в трубах, ОНТИ, 1936.
43. Эйгенсон Л. С., Моделирование, „Советская наука", 1952.
44. Эрлих А. М., Паропроводы, их арматура и прочие детали, ОНТИ, 1937.
45. Яньшин Б. И., Истечение вязкой жидкости через кольцевые и прямоугольные щели, МВТУ, „Гидромашиностроение" № 5, Машгиз, 1949.
46. Тольцман В. Ф. и Шевелев Ф. А., Гидравлическое сопротивление резиновых рукавов. Исследования по гидравлике трубопроводов, Стройиздат, 1952.
47. Чарный И. А., Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах, ГТТИ, 1951.
48. Яньшин Б. И., Улучшенные формы дроссельных затворов, МВТУ, „Машины и приборы" № 21, Машгиз, 1953.
49. Инструкция для проверки дифманометров-расходомеров, работающих в комплекте с диафрагмами и соплами. Комитет по делам мер и измерительных приборов, 1952.
50. Моторные топлива, масла и жидкости, Гостоптехиздат, 1949.
51. Нефтепродукты. Методы испытаний. Стандартгиз, 1950.
52. Сборник стандартов на нефтепродукты. Стандартгиз, 1941.
53. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости, т. I, ИЛ, 1948.
54. Технические нормы на нефтепродукты. Гостоптехиздат, 1952.
55. Техническая энциклопедия, т. 9, 1929.
56. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин, т. 5, 1930.

ГЛАВА XVII

ГИДРОАЭРОГАЗОДИНАМИКА

ГИДРОАЭРОДИНАМИКА

Основные понятия. Законы движения жидкостей и газов во многом одинаковы, и поэтому в гидроаэродинамике жидкости и газы объединяют в единое понятие жидкостей. В гидроаэродинамике помимо реальных жидкостей и газов рассматриваются различные модели жидкостей, которые лишь приближенно соответствуют реальным жидкостям и газам. Можно указать три основные модели жидкостей, а именно: идеальная несжимаемая жидкость, идеальная сжимаемая жидкость и вязкая несжимаемая жидкость. Реальные жидкости в большей или меньшей степени и сжимаемы, и вязки.

Свойства жидкостей, которые рассматриваются в гидроаэродинамике, часто зависят от характера движения. Так, например, сжимаемую жидкость — воздух — при малых скоростях с большой степенью точности можно считать несжимаемой.

Характерной особенностью жидкостей и газов является их текучесть, т. е. изменение формы жидкого объема даже под действием малых сил.

В гидроаэродинамике предполагается, что вещество в любом рассматриваемом объеме распределено непрерывно.

Малый объем жидкости произвольной формы называется *частицей жидкости.* Положение частицы жидкости определяется обычно координатами ее центра тяжести.

Изучение движения жидкости может быть произведено двумя методами. В первом методе, развитом Лагранжем, рассматривается движение с течением времени отдельных жидких частиц; во втором, развитом Эйлером, объектом изучения является не сама жидкость, а пространство, заполненное движущейся жидкостью, и при этом изучаются изменения различных элементов движения с течением времени в каждой фиксированной точке пространства и изменения этих элементов движения при переходе от одной точки пространства к другой. При лагранжевом представлении движения жидкости координаты центра тяжести каждой частицы жидкости являются функциями времени t и начального положения частицы a, b, c, т. е.

$$x = f_1(a, b, c, t); \quad y = f_2(a, b, c, t);$$
$$z = f_3(a, b, c, t).$$

Величины a, b, c и t называются *переменными Лагранжа.* Проекции вектора скорости $\bar{v}$ и ускорения $\bar{w}$ частицы жидкости на оси координат x, y, z:

$$v_x = \frac{\partial f_1}{\partial t}; \quad v_y = \frac{\partial f_2}{\partial t}; \quad v_z = \frac{\partial f_3}{\partial t};$$

$$w_x = \frac{\partial^2 f_1}{\partial t^2}; \quad w_y = \frac{\partial^2 f_2}{\partial t^2}; \quad w_z = \frac{\partial^2 f_3}{\partial t^2}.$$

Элементы движения жидкости в эйлеровом представлении рассматриваются как функции координат точки x, y, z и времени t, называемых *переменными Эйлера.* Проекции вектора скорости и ускорения на прямоугольные оси x, y, z:

$$v_x = f_1(x, y, z, t); \quad v_y = f_2(x, y, z, t);$$
$$v_z = f_3(x, y, z, t);$$

$$w_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z};$$

$$w_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z};$$

$$w_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}.$$

Метод Лагранжа позволяет определить пути отдельных частиц жидкости с течением времени, т. е. их *траектории*. Метод Эйлера дает возможность установить спектры *линий тока*, т. е. таких линий, касательные к которым в каждой точке для данного момента времени совпадают с направлением вектора скорости. Дифференциальные уравнения линий тока:

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z}.$$

Движение, при котором скорость жидкости, давление и другие величины в каждой точке пространства изменяются с течением времени, называется *неустановившимся движением*. Если же скорость жидкости, давление и другие величины в каждой точке пространства не зависят от времени, то движение жидкости называется *установившимся движением*.

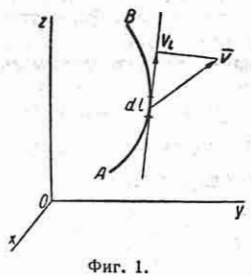
Для установившихся движений жидкости линии тока совпадают с траекториями частиц жидкости.

Часть жидкости, ограниченная линиями тока, проведенными через все точки бесконечно малого замкнутого контура, называется *трубкой тока* или *струйкой*.

Циркуляция скорости Γ по контуру L (фиг. 1):

$$\Gamma = \int\limits_{(L)} v_l dl = \int\limits_{(L)} (v_x dx + v_y dy + v_z dz),$$

где v_l — проекция вектора скорости на касательную к контуру L; dl — элемент контура L.



Фиг. 1.

Циркуляция по замкнутому контуру записывается

$$\Gamma = \oint v_l dl.$$

Вихрь скорости есть вектор $\bar{\Omega} = \operatorname{rot}\bar{v}$, проекции которого на оси координат x, y, z определяются формулами

$$\Omega_x = (\operatorname{rot}\bar{v})_x = \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z};$$

$$\Omega_y = (\operatorname{rot}\bar{v})_y = \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x};$$

$$\Omega_z = (\operatorname{rot}\bar{v})_z = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}.$$

Потоком вектора скорости через поверхность Σ называется поверхностный интеграл

$$\iint\limits_{(\Sigma)} v_n ds = \iint\limits_{(\Sigma)} (v_x dydz + v_y dzdx + v_z dxdy),$$

где v_n — проекция вектора скорости на нормаль к поверхности, ds — элемент поверхности.

Расхождением вектора скорости, или *дивергенцией*, называется поток скорости, отнесенный к единице объема, через замкнутую поверхность Σ, ограничивающую бесконечно малый объем ΔV, т. е.

$$\operatorname{div}\bar{v} = \lim_{\Delta V \to 0} \iint\limits_{(\Sigma)} \frac{v_n ds}{\Delta V} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}.$$

Вихревая линия определяется как линия, касательная к которой в каждой точке имеет направление вектора вихря в данной точке. Вихревые линии, проходящие через все точки малого замкнутого контура, образуют *вихревую трубку*.

Дифференциальное уравнение вихревой линии

$$\frac{dx}{\Omega_x} = \frac{dy}{\Omega_y} = \frac{dz}{\Omega_z}.$$

Уравнение неразрывности. Уравнение неразрывности в декартовых координатах и переменных Эйлера имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

или

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = 0.$$

Для установившегося движения уравнение неразрывности записывается

$$\frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0.$$

Для несжимаемой жидкости уравнение неразрывности будет

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$

Уравнение неразрывности в цилиндрических координатах r, θ, x имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho r v_r)}{r\partial r}+\frac{\partial(\rho v_\theta)}{r\partial\theta}+\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}=0,$$

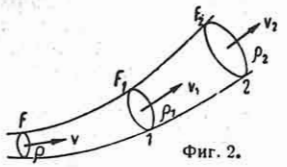
где v_r, v_θ, v_x — проекции вектора скорости на цилиндрические оси координат.

В сферических координатах r, θ, ψ уравнение неразрывности записывается

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho r^2 v_r)}{r^2\partial r}+$$

$$+\frac{\partial(\rho v_\theta \sin\theta)}{r\sin\theta\,\partial\theta}+\frac{\partial(\rho v_\psi)}{r\sin\theta\,\partial\psi}=0,$$

где r — радиус; θ — угол широты; ψ — угол долготы; v_r, v_θ, v_ψ — проекции вектора скорости на сферические оси координат.



Фиг. 2.

Уравнение неразрывности для элементарной трубки тока (фиг. 2)

$$\rho_1 v_1 F_1=\rho_2 v_2 F_2=\rho v F=\text{const},$$

где ρ — плотность; v — скорость; F — площадь нормального сечения трубки.

Уравнения движения. Уравнения движения в форме Эйлера в декартовых координатах имеют вид

$$\frac{dv_x}{dt}=X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{dv_y}{dt}=Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y};$$

$$\frac{dv_z}{dt}=Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}.$$

где p — давление; ρ — плотность; X, Y, Z — проекции массовой силы на оси координат x, y, z.

В развернутом виде уравнения Эйлера записываются:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}=X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_y}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_y}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}=Y-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial y};$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_z}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}=$$

$$=Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}.$$

Уравнения Громека. Уравнения движения Эйлера можно преобразовать к другой форме, впервые указанной И. С. Громека, а именно:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t}+\frac{1}{2}\frac{\partial v^2}{\partial x}+\Omega_y v_z-\Omega_z v_y=$$

$$=X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t}+\frac{1}{2}\frac{\partial v^2}{\partial y}+\Omega_z v_x-\Omega_x v_z=$$

$$=Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y};$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t}+\frac{1}{2}\frac{\partial v^2}{\partial z}+\Omega_x v_y-\Omega_y v_x=$$

$$=Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z},$$

где

$$v^2=v_x^2+v_y^2+v_z^2;\ \Omega^2=\Omega_x^2+\Omega_y^2+\Omega_z^2.$$

Интегралы уравнений движения. Когда массовые силы имеют потенциал U:

$$X=-\frac{\partial U}{\partial x};\quad Y=-\frac{\partial U}{\partial y};\quad Z=-\frac{\partial U}{\partial z},$$

и движение — установившееся, тогда из уравнений движения получается

$$d\left(\frac{v^2}{2}+P+U\right)=\begin{vmatrix} dx & dy & dz \\ v_x & v_y & v_z \\ \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \end{vmatrix},$$

где $P=\int\frac{dp}{\rho}$ — функция давления.

Если этот определитель обращается в нуль, то

$$\frac{v^2}{2}+P+U=C,$$

где C — постоянная.

Это уравнение называется уравнением Бернулли. Определитель может обращаться в нуль вдоль линии тока, вдоль вихревой линии, в случае совпадения

линий тока с вихревыми линиями и в случае безвихревого движения. Для безвихревого движения постоянная C будет одной и той же для всей жидкости. В первых трех случаях постоянная C может меняться при переходе от одной линии тока к другой или от одной вихревой линии к другой. В случае несжимаемой идеальной жидкости, когда массовые силы являются силами тяжести и движение — установившееся и безвихревое, уравнение Бернулли вдоль каждой элементарной трубки тока будет

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} = \text{const},$$

где z выражает геометрическую высоту центра тяжести рассматриваемого нормального сечения трубки; $\frac{v^2}{2g}$ называется *скоростной высотой* и $\frac{p}{\gamma}$ — *пьезометрической высотой.*

Потенциальное движение. В случае потенциального движения (т. е. безвихревого)

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z},$$

где функция $\varphi(x, y, z, t)$ называется *потенциалом скоростей.* Для установившегося движения потенциал скоростей не зависит от времени. Для неустановившегося потенциального движения идеальной, несжимаемой, однородной жидкости имеет место интеграл

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{v^2}{2} + U + P = F(t),$$

где $F(t)$ — произвольная функция времени.

Теорема количества движения. Теорема количества движения для жидкости, заключенной в некотором отрезке трубки тока (фиг. 2), имеет вид

$$dm\,\bar{v}_2 - dm\,\bar{v}_1 = \bar{F}dt,$$

где $\frac{dm}{dt}$ — секундный расход массы через какое-либо сечение трубки тока; $\bar{v}_1$ и $\bar{v}_2$ — скорости в сечениях *1* и *2*; $\bar{F}$ — главный вектор внешних сил, приложенных к выделенному объему жидкости.

Теорема Эйлера. *При отсутствии массовых сил совокупность гидродинамических давлений, приложенных ко всей поверхности некоторого отрезка трубки тока, эквивалентна в случае установившегося движения двум силам:* $\frac{dm}{dt}\bar{v}_2$ и $-\frac{dm}{dt}\bar{v}_1$, *приложенным к концам отрезка и численно равным секундным количествам движения жидкости, вытекающей и втекающей в трубку через сечения на ее концах.*

Если эти две силы пересекаются, то совокупность гидродинамических давлений есть такая совокупность сил, которая, будучи приложена к твердому телу, может быть уравновешена одной силой, равной $\frac{dm}{dt}(\bar{v}_1 - \bar{v}_2)$ и приложенной в точке пересечения векторов $\bar{v}_1$ и $\bar{v}_2$.

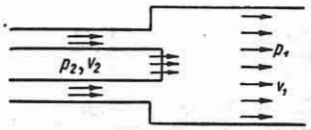
Теорема количества движения может быть применена к любому конечному объему жидкости.

Пусть S — неподвижная, замкнутая, не самопересекающаяся поверхность в потоке жидкости, обтекающем неподвижное твердое тело M; тогда при отсутствии массовых сил будет

$$\int_{(\tau_2)} \bar{v}dm - \int_{(\tau_1)} \bar{v}dm = \bar{p}^{(S)}\,dt + \bar{p}^{(M)}\,dt,$$

где $\bar{p}^{(S)}$ и $\bar{p}^{(M)}$ — главные векторы давлений, приложенные соответственно к поверхности S и поверхности тела M; τ_1 и τ_2 — объемы жидкости, втекающей и вытекающей через поверхность S за время dt.

Теорема о потере кинетической энергии на удар. *Если в какую-либо вязкую жидкую среду, движущуюся с некоторой скоростью v_1, врывается другая жидкость с большей скоростью v_2 и скорость последней, затухая, становится равной v_1, то потеря кинетической энергии жидкости равна кинетической энергии потерянных скоростей.*



Фиг. 3.

При одинаковых геометрических высотах и одинаковой плотности ρ смешивающихся жидкостей

$$p_1 - p_2 = \rho v_1 (v_2 - v_1),$$

где p_1 — давление после смешения, p_2 — давление врывающейся жидкости до смешения (фиг. 3).

Плоское безвихревое движение. Уравнения для плоского установившегося движения несжимаемой жидкости записываются:

$$v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}=X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x};$$

$$v_x\frac{\partial v_y}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_y}{\partial y}=Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}.$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}=0.$$

В случае плоского установившегося движения, в том числе и вихревого, уравнение неразрывности допускает введение функции тока $\psi(x, y)$.

Проекции скорости через функцию тока записываются:

$$v_x=\frac{\partial\psi}{\partial y};\quad v_y=-\frac{\partial\psi}{\partial x}.$$

Направление вектора скорости совпадает с направлением касательной к линии тока

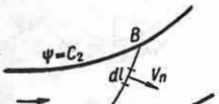
$$\psi(x, y)=\text{const}.$$

Поток жидкости через любую линию, соединяющую две одни и те же линии тока, есть величина постоянная и находится по формуле (фиг. 4)

$$\int_{(A)}^{(B)}v_n dl=\int_{(A)}^{(B)}(v_x dy-v_y dx)=$$

$$=\int_{(A)}^{(B)}d\psi=\psi(B)-\psi(A)=c_2-c_1,$$

где A и B — точки, лежащие на двух различных линиях тока.



Фиг. 4.

Проекции вектора скорости на оси координат через потенциал скоростей записываются:

$$v_x=\frac{\partial\varphi}{\partial x};\quad v_y=\frac{\partial\varphi}{\partial y}.$$

Потенциал скоростей и функция тока связаны между собой соотношениями

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x}=\frac{\partial\psi}{\partial y};\quad \frac{\partial\varphi}{\partial y}=-\frac{\partial\psi}{\partial x}.$$

Линия тока $\psi(x, y)=\text{const}$ и линия равного потенциала $\varphi(x, y)=\text{const}$ образуют сетку взаимно ортогональных линий в каждой точке плоскости x, y.

Функции φ и ψ удовлетворяют уравнению Лапласа и, следовательно, являются *гармоническими функциями.*

Циркуляция по контуру AB:

$$\Gamma=\int_{(A)}^{(B)}v_l dl=\int_{(A)}^{(B)}(v_x dx+v_y dy)=$$

$$=\int_{(A)}^{(B)}d\varphi=\varphi(B)-\varphi(A).$$

Если потенциал скоростей будет непрерывной и однозначной функцией координат, то циркуляция по замкнутому контуру равна нулю.

Комплексный потенциал скоростей. Функция $w=\varphi+i\psi$ комплексного переменного $z=x+iy$, где $i=\sqrt{-1}$, называется *комплексным потенциалом.*

Комплексной скоростью называется производная от комплексного потенциала:

$$\frac{dw}{dz}=v_x-iv_y=ve^{-i\alpha}=v(\cos\alpha-i\sin\alpha),$$

где α — угол наклона вектора скорости v с осью x, и

$$v=\left|\frac{dw}{dz}\right|=\sqrt{v_x^2+v_y^2}.$$

Любая аналитическая функция комплексного переменного может быть рассматриваема как комплексный потенциал некоторого потенциального течения жидкости, причем действительная часть будет потенциалом скоростей, а мнимая — функцией тока.

Простейшие случаи потенциальных движений.

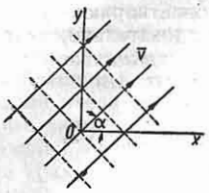
1) Равномерный поток, параллельный оси x. Комплексный потенциал $w=Uz$; $\frac{dw}{dz}=U$. Потенциал скоростей $\varphi=Ux$; функция тока $\psi=Uy$. Проекции скорости на координатные оси $v_x=U$; $v_y=0$. Линии тока — прямые, параллельные оси x. Линии равного потенциала — прямые, параллельные оси y.

2) Равномерный поток, параллельный оси y.

$$w=-iVz;\quad \frac{dw}{dz}=-iV;$$

$$\varphi=Vy;\quad \psi=-Vx;\quad v_x=0;\quad v_y=V$$

3) Равномерный поток под углом α с осью x (фиг. 5). Путем сложения равномерных потоков вдоль осей x и y получается поток под углом α с осью x:



Фиг. 5.

$$w = (U - iV)\,z = ve^{-i\alpha}z;$$

$$\frac{dw}{dz} = U - iV;$$

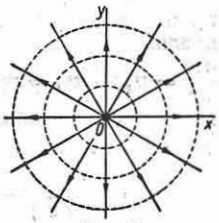
$$\varphi = Ux + Vy;$$

$$\psi = Uy - Vx;\quad v_x = U;\quad v_y = V.$$

4) Источник или сток. Комплексный потенциал

$$w = \frac{q}{2\pi}\ln z$$

при $q > 0$ изображает поток от точечного источника, помещенного в начале координат и имеющего мощность, равную q (фиг. 6); при $q < 0$ — поток от точечного стока.



Фиг. 6.

Мощностью источника (стока) q называется *секундное количество* вытекающей (источник) или втекающей (сток) жидкости. Для источника или стока имеем

$$\frac{dw}{dz} = \frac{q}{2\pi}\,\frac{1}{z};\quad \varphi = \frac{q}{2\pi}\ln\sqrt{x^2+y^2};$$

$$\psi = \frac{q}{2\pi}\operatorname{arc\,tg}\left(\frac{y}{x}\right);\quad v_x = \frac{q}{2\pi}\,\frac{x}{x^2+y^2};$$

$$v_y = \frac{q}{2\pi}\,\frac{y}{x^2+y^2};$$

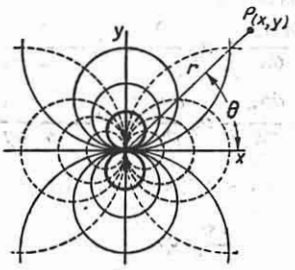
$$v = \frac{q}{2\pi}\,\frac{1}{r};\quad r = \sqrt{x^2+y^2}.$$

Линии тока — прямые, проходящие через начало координат. Линии равного потенциала — концентрические окружности с центром в начале координат.

В полярных координатах r, θ $(z = re^{i\theta})$

$$\varphi = \frac{q}{2\pi}\ln r;\quad \psi = \frac{q}{2\pi}\theta.$$

5) Диполь (фиг. 7). *Диполем* называется совокупность источника и стока с мощностями соответственно q и $-q$, находящихся на бесконечно малом расстоянии друг от друга. Для диполя, на-



Фиг. 7.

ходящегося в начале координат и ось которого совпадает с осью x, имеем

$$w = -\frac{M}{2\pi}\,\frac{1}{z} = -\frac{M}{2\pi}\,\frac{\cos\theta - i\sin\theta}{r},$$

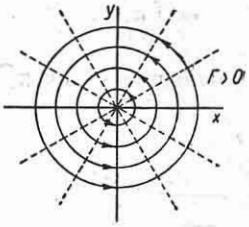
где $M = \lim_{\substack{q\to\infty,\\ h\to 0}}(qh)$ — момент диполя, причем $qh = \text{const}$ и h — расстояние между источником и стоком.

$$\frac{dw}{dz} = v_x - iv_y = \frac{M}{2\pi}\,\frac{1}{z^2} = \frac{M}{2\pi}\,\frac{e^{-2i\theta}}{r^2};$$

$$\varphi = -\frac{M}{2\pi}\,\frac{x}{x^2+y^2} = -\frac{M}{2\pi}\,\frac{\cos\theta}{r};$$

$$\psi = \frac{M}{2\pi}\,\frac{y}{x^2+y^2} = \frac{M}{2\pi}\,\frac{\sin\theta}{r}.$$

6) Точечный вихрь (фиг. 8). Для точечного вихря, расположенного в начале координат,



Фиг. 8.

$$w = \frac{\Gamma}{2\pi i}\ln z;$$

$$\frac{dw}{dz} = \frac{\Gamma}{2\pi i}\,\frac{1}{z};$$

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi}\,\frac{1}{r};$$

$$\varphi = \frac{\Gamma}{2\pi}\operatorname{arc\,tg}\left(\frac{y}{x}\right) = \frac{\Gamma}{2\pi}\theta;$$

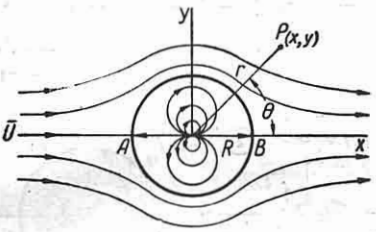
$$\psi = -\frac{\Gamma}{2\pi}\ln\sqrt{x^2+y^2} = -\frac{\Gamma}{2\pi}\ln r,$$

где Γ — циркуляция скорости при обходе контура вокруг точечного вихря.

7) Обтекание кругового цилиндра. Складывая комплексный потенциал равномерного потока вдоль оси x с комплексным потенциалом диполя, получим обтекание кругового цилиндра (фиг. 9). Комплексный потенциал

$$w = U\left(z + \frac{R^2}{z}\right),$$

где R — радиус цилиндра; U — скорость набегающего потока.



Фиг. 9.

Потенциал скоростей и функция тока будут

$$\varphi = Ux\left(1 + \frac{R^2}{x^2+y^2}\right) =$$

$$= U\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) r\cos\theta;$$

$$\psi = Uy\left(1 - \frac{R^2}{x^2+y^2}\right) =$$

$$= U\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) r\sin\theta.$$

Проекции скорости на направление радиуса r и перпендикулярно к нему определяются по формулам:

$$v_r = \frac{\partial\varphi}{\partial r} = U\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right)\cos\theta;$$

$$v_\theta = \frac{\partial\varphi}{r\partial\theta} = -U\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right)\sin\theta.$$

На цилиндре имеются две критические точки, т. е. такие точки, в которых скорость обращается в нуль. Распределение давления по цилиндру находится по формуле

$$p - p_\infty = \frac{\rho U^2}{2}(1 - 4\sin^2\theta),$$

где p — давление в какой-либо точке цилиндра; p_∞ — давление в набегающем невозмущенном потоке.

Коэффициент давления

$$\bar{p} = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} = 1 - U\sin^2\theta\left(q_\infty = \frac{\rho U^2}{2}\right).$$

8) Обтекание цилиндра циркуляционным потоком. Обтекание кругового цилиндра циркуляционным потоком можно получить сложением трех потенциальных потоков: равномерного потока, параллельного оси x, потока от диполя и потока от точечного вихря. Комплексный потенциал результирующего потока

$$w = U\left(z + \frac{R^2}{z}\right) - \frac{\Gamma}{2\pi i}\ln z.$$

Потенциал скоростей и функция тока записываются:

$$\varphi = U\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) r\cos\theta - \frac{\Gamma}{2\pi}\theta;$$

$$\psi = U\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) r\sin\theta + \frac{\Gamma}{2\pi}\ln r.$$

Проекции вектора скорости

$$v_r = \frac{\partial\varphi}{\partial r} = U\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right)\cos\theta;$$

$$v_\theta = \frac{\partial\varphi}{r\partial\theta} = -U\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right)\sin\theta - \frac{\Gamma}{2\pi}\frac{1}{r}.$$

Положение критических точек (где $v = 0$) зависит от величин Γ, U и R (фиг. 10).

а) $\Gamma < 4\pi UR$. В этом случае имеются две различные критические точки, лежащие на самом цилиндре.

б) $\Gamma = 4\pi UR$. Обе критические точки совпадают.

в) $\Gamma > 4\pi UR$. В этом случае существует одна критическая точка, расположенная вне контура цилиндра.

Распределение давления определяется по формуле

$$p - p_\infty = \frac{\rho U^2}{2}\left(1 - 4\sin^2\theta - \frac{\Gamma^2}{4\pi^2U^2R^2} - \frac{2\Gamma\sin\theta}{\pi RU}\right).$$

Коэффициент давления

$$\bar{p} = \frac{2(p - p_\infty)}{\rho U^2} =$$

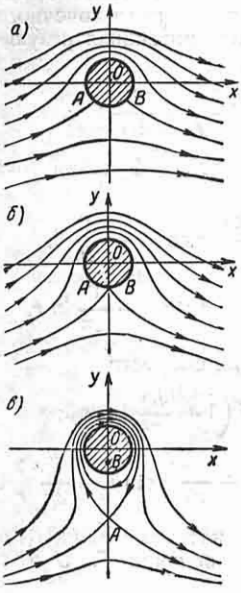
$$= 1 - 4\sin^2\theta - \frac{\Gamma^2}{4\pi^2U^2R^2} - \frac{2\Gamma\sin\theta}{\pi RU}.$$

Проекции X и Y результирующего давления на поверхность цилиндра единичной длины будут:

$$X = -\oint p \cos(n, x)\, dl = 0;$$

$$Y = -\oint p \cos(n, y)\, dl = -\rho U\Gamma.$$

Последняя формула выражает собой частный случай фундаментальной теоремы Н. Е. Жуковского о подъемной силе крыла в применении к обтеканию цилиндра. Эта формула справедлива для безотрывного обтекания любого контура.



Фиг. 10.

Направление результирующего давления получается поворотом вектора скорости невозмущенного потока на прямой угол против циркуляции.

Если вектор скорости невозмущенного потока составляет с осью OX угол α, то комплексный потенциал будет

$$w = Ue^{-i\alpha}\left(z + \frac{R^2 e^{2\alpha i}}{z}\right) - \frac{\Gamma}{2\pi i}\ln z.$$

Формулы Чаплыгина. С. А. Чаплыгин дал формулы для главного вектора и главного момента сил гидродинамических давлений, действующих на цилиндр произвольного сечения при обтекании его установившимся потенциальным потоком несжимаемой жидкости.

Эти формулы записываются:

$$\overline{R} = X - iY = \frac{i\rho}{2}\oint_{(C)} \bar{v}^2 dz =$$

$$= \frac{i\rho}{2}\oint_{(C)} \left(\frac{dw}{dz}\right)^2 dz;$$

$$L = Re\left(-\frac{\rho}{2}\oint_{(C)} \bar{v}^2 z\, dz\right) =$$

$$= Re\left[-\frac{\rho}{2}\oint_{(C)} \left(\frac{dw}{dz}\right)^2 z\, dz\right],$$

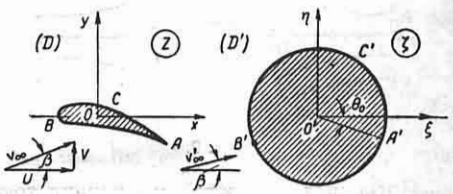
где C — контур цилиндра; $\bar{v} = v_x - iv_y$; знак Re обозначает здесь действительную часть комплексного выражения.

Метод конформного отображения. Решение задачи об обтекании циркуляционным потоком кругового цилиндра позволяет найти обтекание произвольного профиля, если известно конформное отображение внешности этого профиля на внешность круга (фиг. 11).

Если функция

$$\zeta = F(z) \quad (\zeta = \xi + i\eta,\ z = x + iy)$$

устанавливает взаимно однозначное конформное соответствие между областями



Фиг. 11.

(D) и (D'), то комплексный потенциал обтекания профиля C запишется в таком виде:

$$w(z) = k\bar{v}_\infty F(z) + \frac{kv_\infty R^2}{F(z)} - \frac{\Gamma}{2\pi i}\ln F(z)$$

где $v_\infty = U + iV$ — комплексная скорость набегающего на профиль C потока; $\bar{v}_\infty$ — сопряженная комплексная скорость; R — радиус цилиндра; $k > 0$ — коэффициент, входящий в ряд Лорана

$$z = k\zeta + k_0 + \frac{k_1}{\zeta} + \frac{k_2}{\zeta^2} + \dots$$

Циркуляция Γ определяется на основании гипотезы Н. Е. Жуковского, утверждающей, что скорость в острой кромке профиля должна быть конечной.

Из гипотезы Жуковского следует

$$\Gamma = 4\pi kR\,|v_\infty|\sin(\theta_0 - \beta),$$

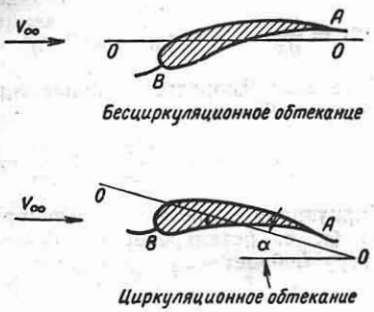
где $v_\infty = |v_\infty| e^{i\beta}$ и θ_0 — аргумент точки A являющейся отображением точки A (фиг. 11).

Если профиль повернуть по отношению к набегающему потоку на угол $\theta_0 = \beta$, то получим циркуляцию $\Gamma = 0$. Угол $\theta_0 = \beta$ называется углом бесциркуляционного обтекания профиля.

Повертывая теперь профиль на угол $\alpha = \beta - \theta_0 > 0$ (фиг. 12), будем иметь снова безотрывное, но уже циркуляционное обтекание с циркуляцией

$$\Gamma = -4\pi kR\,|\,v_\infty\,|\sin\alpha.$$

Угол α между направлением набегающего потока и направлением бесцирку-



Фиг. 12.

ляционного обтекания OO называется *теоретическим углом атаки*

Реакция жидкости на профиль C:

$$\overline{R} = X - iY = i\rho\Gamma\overline{v}_\infty;$$

$$L = Re\,(-2\pi\rho\overline{v}_\infty A_2),$$

где A_2 — коэффициент, входящий в разложение

$$\frac{dw}{dz} = \overline{v}_\infty - \frac{\Gamma}{2\pi iz} + \frac{A_2}{z^2} + \ldots$$

и равный

$$A_2 = kk_1\overline{v}_\infty - k^2R^2v_\infty - \frac{\Gamma k_0}{2\pi i}.$$

Перпендикулярная к вектору v_∞ сила P, действующая на контур C определяется по формуле Н. Е. Жуковского:

$$P = \rho\,|\,\Gamma\,|\,|\,v_\infty\,| = 4\pi\rho kR\,|\,v_\infty\,|^2\sin\alpha.$$

Обтекание плоской пластинки. Прямолинейный отрезок (пластинка) длиной $2a$ с помощью формулы Н. Е. Жуковского

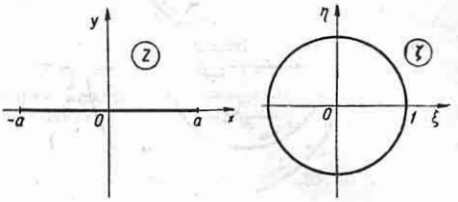
$$z = \frac{a}{2}\left(\zeta + \frac{1}{\zeta}\right)$$

может быть отображен в окружность радиуса 1, а внешность отрезка — во внешность круга (фиг. 13).

Комплексный потенциал обтекания пластинки, расположенной по отношению к набегающему потоку под углом атаки α ($\theta_0 = 0$), будет (фиг. 14)

$$w = Uz - iV\sqrt{z^2 - a^2},$$

где U и V — проекции вектора скорости v_∞ на оси координат x и y.



Фиг. 13.

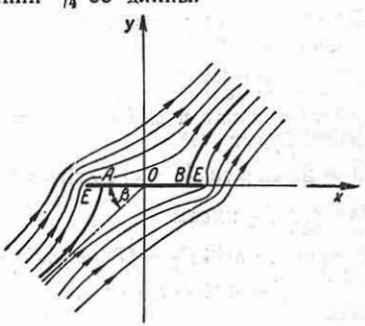
Циркуляция

$$\Gamma = -2\pi a\,|\,v_\infty\,|\sin\alpha.$$

Сила, действующая на пластинку и перпендикулярная к v_∞,

$$P = 2\pi a\rho\,|\,v_\infty\,|^2\sin\alpha.$$

Точка приложения силы P находится от передней кромки пластинки на расстоянии $^1/_4$ ее длины.



Фиг. 14.

Симметричный профиль Н. Е. Жуковского. Если взять две окружности k и K (фиг. 15), то область между ними отображается в симметричный профиль (руль Жуковского).

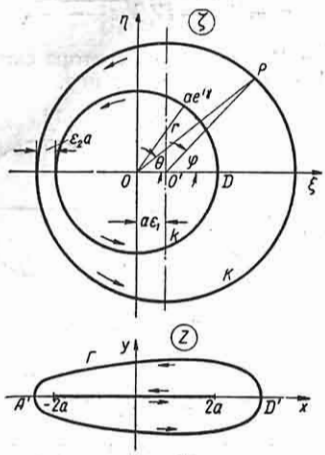
Радиусы окружностей k и K имеют значения

$$R_1 = a;\ R_2 = a\,(1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2).$$

Отображение производится с помощью функции Жуковского

$$z = \zeta + \frac{a^2}{\zeta}.$$

Окружность k ($\zeta = ae^{i\gamma}$) преобразуется в прямолинейный отрезок длиной $4a$, а окружность K — в контур Г плоскости z.



Фиг. 15.

Если ввести в функцию Жуковского эллиптические координаты μ и θ с помощью выражения

$$\zeta = ae^{i(\mu + i\theta)},$$

то функцию Жуковского можно записать и в таком виде:

$$z = 2a \operatorname{ch}(\mu + i\theta).$$

Действительная и мнимая части этой функции будут:

$$x = 2a \operatorname{ch}\mu \cos\theta;\ y = 2a \operatorname{sh}\mu \sin\theta.$$

Для r и R_2 имеем

$$r = OP = ae^{\mu};\ R_2 = O'P = ae^{\mu_0} = a(1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2).$$

Здесь

$$\mu_0 = \ln(1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2).$$

Эллиптические координаты μ и θ выражаются в функции угла φ.

Применяя теорему косинусов к треугольнику OPO', будем иметь

$$e^{2(\mu - \mu_0)} = 1 + 2\delta\cos\varphi + \delta^2,$$

где

$$\delta = \frac{\varepsilon_1}{1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Пользуясь теоремой синусов, получим

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\sin\varphi}{\delta + \cos\varphi}.$$

Н. Е. Жуковский и С. А. Чаплыгин дали также теоретическое построение некоторых классов не симметричных профилей, имеющих важное практическое значение.

Пространственное безвихревое движение. Проекции скорости на координатные оси через потенциал скоростей записываются:

$$v_x = \frac{\partial\varphi}{\partial x};\ v_y = \frac{\partial\varphi}{\partial y};\ v_z = \frac{\partial\varphi}{\partial z}.$$

Потенциал скоростей удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0.$$

Циркуляция скорости для потенциального (т. е. безвихревого) потока по контуру L будет

$$\Gamma = \int_{(A)}^{(B)} (v_x dx + v_y dy + v_z dz) = \varphi(B) - \varphi(A).$$

Поверхности, на которых потенциал скоростей сохраняет постоянное значение, называются *эквипотенциальными поверхностями*.

Ниже даны примеры потенциальных потоков.

1) Источник (или сток) в пространстве. Потенциал скоростей для источника мощности q, помещенного в начале координат, будет

$$\varphi = -\frac{q}{4\pi r},\ \text{где}\ r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Величина скорости определяется по формуле

$$v = \frac{q}{4\pi r^2}$$

и направлена от источника по радиусу в случае стока ($q < 0$).

2) Диполь. Потенциал скоростей диполя

$$\varphi = -\frac{M}{4\pi}\frac{\cos\theta}{r^2},$$

где r — расстояние от диполя до точки; θ — угол между радиусом вектора точки и осью диполя; M — момент диполя.

3) Обтекание шара. Потенциал скоростей

$$\varphi = Ur\left(1 + \frac{R^3}{2r^3}\right)\cos\theta,$$

где U — скорость набегающего потока; R — радиус шара; θ — угол между радиусом-вектором r точки и осью диполя, совпадающей с направлением набегающего потока;

$$R = \sqrt[3]{\frac{M}{2\pi U}}.$$

Радиальная v_r и окружная v_s скорости в меридиональной плоскости определяются выражениями:

$$v_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = U\left(1 - \frac{R^3}{r^3}\right)\cos\theta;$$

$$v_s = \frac{\partial \varphi}{\partial s} = \frac{\partial \varphi}{r\partial\theta} = -U\left(1 + \frac{R^3}{2r^3}\right)\sin\theta.$$

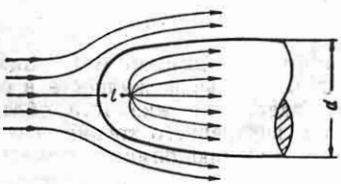
Давления p на поверхности шара

$$p = p_\infty + \frac{\rho U^2}{2}\left(1 - \frac{9}{4}\sin^2\theta\right).$$

Коэффициент давления

$$\bar{p} = \frac{2(p - p_\infty)}{\rho U^2} = 1 - \frac{9}{4}\sin^2\theta.$$

4) Обтекание полутела (фиг. 16). Складывая течение от источника с потоком, параллельным оси Ox, получим обтекание бесконечного полутела.



Фиг. 16.

Потенциал скоростей

$$\varphi = Ux - \frac{q}{4\pi r},$$

где

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Диаметр полутела

$$d = 2\sqrt{\frac{q}{\pi U}}.$$

Расстояние l источника от передней точки тела равно $0{,}25d$.

Вихревое движение. Движение жидкости, при котором вихрь вектора скорости $\bar{\Omega} = \operatorname{rot}\bar{v}$ отличен от нуля по крайней мере в некоторой рассматриваемой части, называется *вихревым движением жидкости.*

Циркуляция по замкнутому контуру L связана с потоком вектора вихря через любую поверхность Σ, ограниченную данным контуром, формулой

$$\Gamma = \oint_{(L)} v_l dl = \iint_{(\Sigma)} \Omega_n dS,$$

где dl и dS — элементы соответственно контура L и поверхности Σ; v_l — проекция вектора скорости на касательную к контуру L; Ω_n — проекция вектора вихря на нормаль к поверхности Σ.

Для бесконечно малого плоского контура имеем

$$\Gamma = \Omega_n \sigma,$$

где σ — площадь, охватываемая бесконечно малым контуром.

Расхождение вектора вихря

$$\operatorname{div}\bar{\Omega} = \frac{\partial \Omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \Omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \Omega_z}{\partial z} = 0.$$

Поток вектора вихря через любую замкнутую поверхность Σ равен нулю, т. е.

$$\iint_{(\Sigma)} \Omega_n dS = 0.$$

Часть жидкости, заключенная внутри элементарной вихревой трубки, называется *вихревой нитью. Интенсивностью* или *напряжением* вихревой трубки называется произведение величины вихря на площадь сечения трубки.

Интенсивность вихревой трубки равна циркуляции по любому замкнутому контуру, охватывающему трубку, и во всех сечениях одинакова.

Теорема Томсона. *Если массовые силы, под действием которых движется жидкость, имеют потенциал U, и плотность жидкости есть функция только давления, то циркуляция скорости по любому замкнутому контуру, проведенному через одни и те же частицы жидкости, есть величина постоянная во все время движения жидкости, т. е.* $\frac{d\Gamma}{dt} = 0.$

Теоремы о вихрях.

1) *Если массовые силы имеют потенциал, а плотность жидкости есть функция только давления, то частицы жидкости, образующие вихревую линию в некоторый момент времени,*

будут образовывать ее во все время движения, т. е. вихревые линии, а следовательно и вихревые трубки, сохраняются.

2) При тех же предположениях интенсивность любой вихревой трубки во все время движения остается постоянной, т. е.

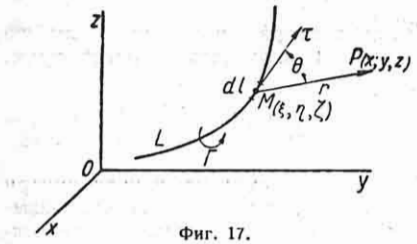
$$\Omega_1\sigma_1 = \Omega_2\sigma_2 = \Omega\sigma = \text{const},$$

где σ — площадь сечения трубки, нормального к ее оси.

Скорость, индуцируемая вихревой нитью. Если дана вихревая нить постоянной интенсивности Г, то скорость $\Delta\bar{v}$ в точке $P(x, y, z)$, индуцируемая элементом dl этой вихревой нити, определяется по формуле (фиг. 17)

$$\Delta\bar{v} = \frac{\Gamma}{4\pi}\,[\bar{\tau}\,\bar{r}]\,\frac{dl}{r^3},$$

где $\bar{\tau}$ — единичный вектор, направленный по касательной к вихревой линии в точке $M(\xi, \eta, \zeta)$.



Фиг. 17.

Модуль индуцируемой скорости будет

$$\Delta v = \frac{\Gamma}{4\pi}\,\frac{\sin\theta\, dl}{r^2}.$$

Скорость в точке P, индуцируемая всей вихревой линией L, определится по формуле

$$\bar{v} = \frac{\Gamma}{4\pi}\int\limits_{(L)} [\bar{\tau}\,\bar{r}]\,\frac{dl}{r^3}.$$

Проекции скорости записываются:

$$v_x = \frac{\Gamma}{4\pi}\int\limits_{(L)} \frac{(\eta - y)\,d\zeta - (\zeta - z)\,d\eta}{r^3};$$

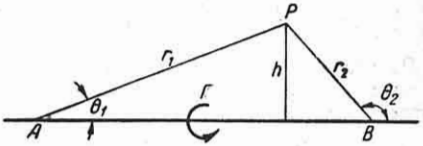
$$v_y = \frac{\Gamma}{4\pi}\int\limits_{(L)} \frac{(\zeta - z)\,d\xi - (\xi - x)\,d\zeta}{r^3};$$

$$v_z = \frac{\Gamma}{4\pi}\int\limits_{(L)} \frac{(\xi - x)\,d\eta - (\eta - y)\,d\xi}{r^3},$$

где

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}.$$

Прямолинейная вихревая нить. Скорость в точке P от отрезка прямолинейной вихревой линии AB (фиг. 18) определяется по формуле



Фиг. 18.

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi h}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2).$$

Для бесконечной прямолинейной вихревой нити

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi h}.$$

Для полубесконечной вихревой нити, когда $\theta_1 = 0$ и $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$, скорость

$$v = \frac{\Gamma}{4\pi h}.$$

Уравнения движения вязкой жидкости. Реальная жидкость в отличие от идеальной жидкости обладает свойством внутреннего трения, что приводит к появлению, помимо нормальных сил давления $\bar{p}$, еще касательных сил трения $\bar{\tau}$.

Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в проекциях на прямоугольные оси координат записываются:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_x}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\Delta v_x;$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_y}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\Delta v_y;$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\Delta v_z,$$

где $\bar{F}(X, Y, Z)$ — вектор массовой силы; ρ — плотность; $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ — кинематический коэффициент вязкости и

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

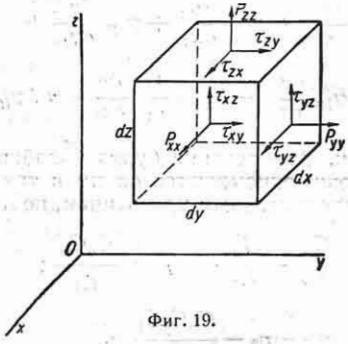
— оператор Лапласа.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0.$$

Составляющие напряжений. Напряжение (поверхностная сила, приходящаяся на единицу площади) является в действительности вектором и не совпадает вообще с направлением нормали к поверхности.

Если нормаль к площадке, на которую действует поверхностная сила, имеет, например, направление оси x, то составляющие напряжений по осям координат x, y, z обозначаются соответственно через p_{xx}, τ_{xy}, τ_{xz} (фиг. 19).



Фиг. 19.

В жидкости, находящейся в покое или движущейся, но без внутреннего трения, давление всегда нормально к выделенной площадке и имеет одинаковое значение во всех направлениях.

При плоском движении вязкой жидкости в случае, когда $v_y = v_z = 0$, имеем

$$\tau_{zx} = \tau = \mu \frac{\partial v_x}{\partial z} = \mu \frac{\partial u}{\partial z},$$

где μ — динамический коэффициент вязкости.

Выражения напряжений в несжимаемой жидкости, для которой $\operatorname{div} \bar{v} = 0$, имеют вид:

$$p_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x};$$

$$p_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y};$$

$$p_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z};$$

$$\tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right);$$

$$\tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right);$$

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right),$$

где p — давление, определяемое как среднее значение нормальных давлений, действующих на три взаимно ортогональные плоскости.

Начальные и граничные условия. Начальные условия для задачи о движении вязкой несжимаемой жидкости не отличаются от таковых для случая идеальной жидкости. В обоих случаях должно быть задано в начальный момент $t = 0$ распределение скорости во всей рассматриваемой области.

Граничные условия в случае вязкой жидкости будут иными, чем в случае идеальной жидкости.

Формулировка граничных условий для вязкой жидкости в двух типичных случаях будет следующей:

1) Жидкость примыкает к неподвижной стенке.

В точках, где вязкая жидкость примыкает к твердой неподвижной стенке, скорость жидкости обращается в нуль.

2) Жидкость примыкает к подвижной стенке.

В точках, где вязкая жидкость примыкает к подвижной стенке, скорость жидкости должна по величине и направлению совпадать со скоростью соответствующей точки стенки.

Пример. Одномерное течение между двумя параллельными плоскими стенками.

Пусть уравнения этих плоскостей будут (фиг. 20)

$$z = -h; \quad z = +h.$$

Допустим, что внешних сил нет, движение стационарно и происходит параллельно оси Ox. Тогда основные уравнения запишутся:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right);$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

Граничное условие для v:

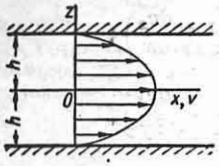
$$v = 0 \text{ при } z = \pm h.$$

Решение этого уравнения будет

$$v = -\frac{1}{2\mu}\frac{\partial p}{\partial x}(h^2 - z^2).$$

На фиг. 20 графически изображено полученное распределение скорости.

Количество жидкости Q, протекающее в единицу времени в призме, ограниченной стенками и двумя плоскостями $y = 0$ и $y = b$, определяется по формуле



Фиг. 20.

$$Q = -\frac{2h^3 b}{3\mu}\frac{\partial p}{\partial x}.$$

Если взять на оси Ox две точки на расстоянии l друг от друга и обозначить давления в этих точках соответственно через p_0 и p_1, то получим для перепада давления формулу

$$\frac{p_0 - p_1}{l} = \frac{3\mu Q}{2bh^3}.$$

Закон подобия. Экспериментальные исследования часто производятся над моделями тел, и по этим экспериментальным данным необходимо выяснить поведение в потоке самих тел.

Рассмотрим какое-нибудь уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости, например уравнение движения по оси Oz:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\Delta v_z.$$

Обозначим через t_1, x_1, y_1, z_1, v_1, X_1, Y_1, Z_1, ρ_1, p_1, ν_1—величины, относящиеся к первому течению, а через t_2, x_2, y_2, z_2, v_2, X_2, Y_2, Z_2, ρ_2, p_2, ν_2 — величины, относящиеся ко второму течению, механически подобному первому.

После одинакового выбора начала координат и начала отсчета будем иметь:

$$\frac{t_2}{t_1} = C_t; \quad \frac{x_2}{x_1} = \frac{y_2}{y_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{l_2}{l_1} = C_l,$$

где t_1 и t_2 — соответственные моменты времени; x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 — координаты соответственных точек двух механически подобных течений; l_1 и l_2 — соответствующие размеры; C_t и C_l — постоянные.

Из понятия механического подобия следует:

$$v_2(x_2, y_2, z_2, t_2) = C_v v_1(x_1, y_1, z_1, t_1),$$

где C_v — новая постоянная, равная $\frac{C_l}{C_t}$.

Для соответственных точек имеем также

$$\frac{X_2(x_2, y_2, z_2, t_2)}{X_1(x_1, y_1, z_1, t_1)} = \frac{Y_2}{Y_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = C_F;$$

$$\rho_2 = C_\rho\rho_1; \quad \nu_2 = C_\nu\nu_1,$$

где C_F, C_ρ, C_ν — постоянные.

Для второго течения уравнение движения следующее:

$$\frac{C_v}{C_t}\frac{\partial v_{1z}}{\partial t} + \frac{C_v^2}{C_l}\left(v_{1x}\frac{\partial v_{1z}}{\partial x_1} + v_{1y}\frac{\partial v_{1z}}{\partial y_1} + v_{1z}\frac{\partial v_{1z}}{\partial z_1}\right) = C_F Z_1 - \frac{1}{C_\rho C_l\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial z_1} + \frac{C_\nu C_v}{C_l^2}\nu_1\Delta v_{1z}.$$

Если второе течение действительно подобно первому течению, то оно описывается уравнением

$$\frac{\partial v_{1z}}{\partial t} + v_{1x}\frac{\partial v_{1z}}{\partial x_1} + v_{1y}\frac{\partial v_{1z}}{\partial y_1} + v_{1z}\frac{\partial v_{1z}}{\partial z_1} = Z_1 - \frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p}{\partial z_1} + \nu_1\Delta v_{1z}.$$

Итак, два течения будут подобными, если они описываются одним и тем же дифференциальным уравнением; поэтому

$$\frac{C_v}{C_t} = \frac{C_v^2}{C_l} = C_F = \frac{C_\nu C_v}{C_l^2};$$

$$p_2 = \frac{C_v C_\rho C_l}{C_t}p_1.$$

Эти равенства позволяют выразить все постоянные через C_v и C_l.

Имеем

$$\frac{C_l C_v}{C_l} = 1; \quad \frac{C_F C_l}{C_v^2} = 1; \quad \frac{C_\nu}{C_v C_l} = 1;$$

$$p_2 = C_\rho C_v^2 p_1,$$

откуда

$$\frac{t_2 v_2}{l_2} = \frac{t_1 v_1}{l_1}; \quad \frac{Z_2 l_2}{v_2^2} = \frac{Z_1 l_1}{v_1^2};$$

$$\frac{\nu_2}{v_2 l_2} = \frac{\nu_1}{v_1 l_1}; \quad \frac{p_2}{\rho_2 v_2^2} = \frac{p_1}{\rho_1 v_1^2}.$$

Эти соотношения являются достаточными условиями механического подобия двух течений жидкости, если, конечно, граничные условия также будут подобны.

Пусть l — характерный для данного движения размер, v — характерная скорость, например скорость набегающего потока. Положим, что внешней массовой силой является сила тяжести, и движение установившееся.

Рассмотрим два числа:

$$\mathrm{Re} = \frac{vl}{\nu} \quad (\textit{число Рейнольдса})$$

и

$$\mathrm{Fr} = \frac{v^2}{lg} \quad (\textit{число Фруда}).$$

Два течения вязкой несжимаемой жидкости, находящейся под действием силы тяжести, обладающие одинаковыми числами Рейнольдса и Фруда, являются подобными, если граничные условия в обоих течениях также подобны.

Пограничный слой. Часть общего аэродинамического сопротивления (сопротивление трения) вычисляется по методам *теории пограничного слоя*.

Для вычисления сопротивления трения достаточно учесть вязкость лишь в тонком слое, прилегающем к поверхности обтекаемого тела, где скорость частиц жидкости быстро меняется от нуля до скорости внешнего потока. Этот тонкий слой называется *пограничным слоем*. Пограничный слой может быть *ламинарным* и *турбулентным*.

В ламинарном пограничном слое течение имеет слоистый характер, без перемешивания. Наоборот, для течения в турбулентном пограничном слое характерно наличие перемешивания частиц жидкости.

Уравнения установившегося движения жидкости в ламинарном пограничном слое пластинки и слабо искривленных поверхностей можно записать (фиг. 21):

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2};$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0.$$

Ось Ox направлена вдоль пластинки, ось Oy — по нормали к пластинке.

Для решения уравнений пограничного слоя давление должно быть предварительно определено, считая, что поверхность тела обтекается потенциальным потоком.

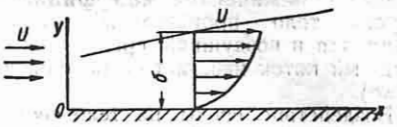
Граничные условия для написанных выше уравнений:

$$v_x = v_y = 0 \text{ при } y = 0;$$

$$v_x = U \quad \text{при } y = \delta,$$

где δ — толщина пограничного слоя; U — скорость набегающего потока.

Напряжение силы трения τ_0 на стенке, толщина пограничного слоя δ и коэффициент сопротивления трения пластинки $C_{x\tau}$ находятся по формулам:



Фиг. 21.

$$\tau_0 = 1{,}328 \sqrt{\mu\rho U^3} \frac{1}{\sqrt{x}};$$

$$\delta = 5{,}2 \sqrt{\frac{\nu x}{U}};$$

$$C_{x\tau} = \frac{2X}{F\rho U^2}; \quad C_{x\tau} = \frac{1{,}328}{\sqrt{\mathrm{Re}}},$$

где $\mathrm{Re} = \frac{Ul}{\nu}$ — число Рейнольдса; l — длина пластинки; X — полная сила сопротивления; F — площадь пластинки.

Приведенный коэффициент $C_{x\tau}$ хорошо согласуется с опытом, если Re не превосходит $3 \cdot 10^5$.

При числах Re, превосходящих $3 \cdot 10^5$, пограничный слой становится турбулентным. Для турбулентного пограничного слоя $C_{x\tau}$ вычисляют по приближенной формуле

Фиг. 22.

$$C_{x\tau} = \frac{0{,}455}{(\lg \mathrm{Re})^{2{,}58}}.$$

Если же пограничный слой смешанный (фиг. 22), то, принимая, что переход

ламинарного слоя в турбулентный происходит при $\mathrm{Re} = 5 \cdot 10^5$, для $C_{x\tau}$ имеем

$$C_{x\tau} = \frac{0{,}455}{(\lg \mathrm{Re})^{2{,}58}} - \frac{1700}{\mathrm{Re}}.$$

Сопротивление трения профиля крыла больше, чем сопротивление трения пластинки, причем приближенно можно считать, что увеличение $C_{x\tau}$ в процентах равно процентному увеличению толщины профиля крыла.

Аэродинамические коэффициенты. Пусть тело произвольным образом движется в воздушной среде (или воздушный поток набегает на неподвижное тело).

Воздействие среды на тело сводится к силам, непрерывно распределенным по поверхности этого тела. Аэродинамические поверхностные силы могут быть охарактеризованы величинами нормального $\overline{p}$ и касательного $\overline{\tau}$ напряжений в каждой точке поверхности тела. В общем случае при геометрическом сложении этих сил по всей поверхности получается главный вектор аэродинамических сил $\overline{R}$ и главный момент $\overline{M}$. Векторы $\overline{R}$ и $\overline{M}$ можно разложить по скоростным осям координат или по связанным. В скоростной системе координат одна из осей (назовем ее осью Ox) всегда направлена по вектору скорости полета. Остальные две оси Oy и Oz принимаются перпендикулярными к оси Ox и должны образовать все вместе правую систему координат. Скоростная система координат (x, y, z) не зависит от ориентировки движущегося тела.

Связанная система координат (x_1, y_1, z_1) жестко связана с движущимся телом.

В скоростной системе координат проекция вектора $\overline{R}$ на направление, обратное направлению скорости полета $Q = -np_x\overline{R} = -X$, называется *силой лобового сопротивления*; проекция вектора $\overline{R}$ на направление, перпендикулярное к скорости полета и лежащее в плоскости симметрии летательного аппарата $P = np_y\overline{R} = Y$, называется *подъемной силой* и $np_z\overline{R} = T = Z$ — боковой силой.

Проекции аэродинамического момента $\overline{M}$ на скоростные оси координат и на связанные оси соответственно обозначаются M_x, M_y, M_z, M_{x_1}, M_{y_1}, M_{z_1}, где M_x (или M_{x_1}) называется моментом крена, M_y (или M_{y_1}) — моментом рысканья и M_z (или M_{z_1}) — продольным моментом.

В связанной системе координат проекции силы $\overline{R}$ будут X_1, Y_1, Z_1, где X_1 — продольная сила; Y_1 — нормальная сила; Z_1 — поперечная сила.

Если ввести безразмерные коэффициенты C_x, C_y, C_z, C_{x_1} (или C_t), C_{y_1} (или C_n), C_{z_1}, то аэродинамические силы в скоростных осях или связанных можно будет записать:

$$Q = C_x qS; \quad Y = C_y qS; \quad Z = C_z qS;$$
$$Q_1 = C_{x_1} qS; \quad Y_1 = C_{y_1} qS; \quad Z_1 = C_{z_1} qS,$$

где $q = \frac{\rho V^2}{2}$ — скоростной напор; S — характерная площадь; C_x — коэффициент лобового сопротивления; C_y — коэффициент подъемной силы; C_z — коэффициент боковой силы; C_{x_1} — коэффициент продольной силы; C_{y_1} — коэффициент нормальной силы; C_{z_1} — коэффициент поперечной силы.

Проекции вектора $\overline{M}$ на скоростные и связанные оси можно записать:

$$M_x = m_x qSl; \quad M_y = m_y qSl; \quad M_z = m_z qSl;$$
$$M_{x_1} = m_{x_1} qSl; \quad M_{y_1} = m_{y_1} qSl;$$
$$M_{z_1} = m_{z_1} qSl,$$

где l — характерный линейный размер; m_x, m_y, m_z, m_{x_1}, m_{y_1}, m_{z_1} — безразмерные коэффициенты моментов. Коэффициент m_x (или m_{x_1}) называется коэффициентом момента крена, m_y (или m_{y_1}) — коэффициентом момента рысканья и m_z (или m_{z_1}) — коэффициентом продольного момента или коэффициентом момента тангажа.

Переход от аэродинамических коэффициентов в скоростной системе осей координат к аэродинамическим коэффициентам в связанной системе осей осуществляется по формулам:

$$C_{x_1} = C_x \cos(x_1, x) + C_y \cos(x_1, y) + C_z \cos(x_1, z);$$

$$C_{y_1} = C_x \cos(y_1, x) + C_y \cos(y_1, y) + C_z \cos(y_1, z);$$

$$C_{z_1} = C_x \cos(z_1, x) + C_y \cos(z_1, y) + C_z \cos(z_1, z).$$

Если в этих формулах заменить C на m, то получим формулы перехода для моментных коэффициентов.

Можно показать, что взаимное расположение связанных осей и скоростных определяется не девятью углами, а всего двумя: углом атаки α и углом скольжения β.

ГАЗОДИНАМИКА

Основные величины и соотношения. *Газовая динамика* — наука о движении газа с большими скоростями или большими перепадами давлений, при которых существенно сказывается сжимаемость газа. Основной характеристикой сжимаемости газа служит число $M = \frac{v}{a}$, где v — местная скорость газа, a — местная скорость звука.

Если число M мало, то газ можно считать несжимаемым. С увеличением числа M влияние сжимаемости на картину течения газа становится все сильнее. При числе $M > 1$ в газе возникают совершенно новые явления, не имеющие места при дозвуковых скоростях ($M < 1$).

Уравнения установившегося движения газа имеют вид (трение и сила тяжести здесь не учитываются):

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x};$$

$$v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y};$$

$$v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z},$$

где ρ — массовая плотность; p — давление; v_x, v_y, v_z — проекции вектора скорости на неподвижные оси координат x, y, z.

Уравнение неразрывности будет

$$\frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0.$$

Из уравнений движения можно получить уравнение Бернулли в дифференциальной форме

$$\frac{1}{2} dv^2 + \frac{dp}{\rho} = 0.$$

При $\rho = \text{const}$

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}.$$

Уравнение Бернулли в интегральной форме при переменном ρ имеет вид

$$\frac{1}{2}\left(v_1^2 - v^2\right) + \int_p^{p_1} \frac{dp}{\rho} = 0,$$

где v_1, p_1 и v, p — значения скорости и давления в любых двух точках.

Скорость звука или скорость распространения бесконечно малых возмущений определяется по формуле

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}.$$

В несжимаемой жидкости $a = \infty$; в абсолютном вакууме $a = 0$. Скорость звука в воздухе при температуре 0° С равна 332 *м/сек*.

Газ считается *идеальным*, если уравнение состояния для него имеет вид

$$p = R'\rho T = Rg\rho T,$$

где p — давление; ρ — массовая плотность; T — абсолютная температура; $g = 9{,}81$ *м/сек²* — ускорение земного притяжения; $R' = Rg$ — газовая постоянная.

Для воздуха $R' = 287{,}14$ *м²/сек² град* и $R = 29{,}27$ *м/град*.

Уравнение адиабаты для идеального газа

$$\frac{p}{\bar{p}} = \left(\frac{\rho}{\bar{\rho}}\right)^k = \left(\frac{T}{\bar{T}}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где $\bar{p}$, $\bar{\rho}$, $\bar{T}$ — давление, плотность и температура в каком-либо состоянии принятом за начальное; k — постоянный коэффициент; для воздуха $k = 1{,}4$.

Газовая постоянная R и удельные теплоемкости при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v связаны соотношением

$$R = J(c_p - c_v) = Jc_v(k - 1),$$

где $J = 427$ *кГм/кал* — механический эквивалент тепла; $k = \frac{c_p}{c_v}$ — коэффициент, входящий в уравнение адиабаты (для воздуха $c_p = 0{,}24$ *м²/сек² град*).

Теплосодержание (*энтальпия*) идеального газа в тепловых единицах определяется по формуле

$$\iota = c_p T.$$

В механических единицах

$$\iota = Jc_p T.$$

Энтропия идеального газа

$$S=S_0+c_p\ln\left(\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}}\right)=S_0'+c_v\ln\left(\frac{p}{\rho^k}\right),$$

где S_0 и S_0' — постоянные значения энтропии, от которых ведется отсчет.

При отсутствии в газе теплообмена с внешней средой процесс называется *адиабатическим*.

Обратимый адиабатический процесс называется *изэнтропическим процессом*; для него $S=\text{const}$.

Примером неизэнтропического процесса может служить течение газа в пограничном слое.

Для изэнтропических процессов в идеальном газе уравнением состояния будет уравнение адиабаты.

Уравнение Бернулли для идеального газа при адиабатическом процессе записывается

$$\frac{v^2}{2}+\frac{a^2}{k-1}=\text{const}=C.$$

Для идеального газа скорость звука

$$a=\sqrt{k\frac{p}{\rho}}=\sqrt{kR'T}.$$

Для воздуха $a=20{,}1\sqrt{T}$ *м/сек*. Постоянная C, входящая в уравнение Бернулли, определяется по формуле

$$C=\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}=\frac{a_0^2}{k-1}=\frac{v_{\max}^2}{2}=$$

$$=\frac{k+1}{k-1}\frac{a_*^2}{2}=Jc_pT_0=i_0,$$

где величины с индексом нуль относятся к газу в состоянии покоя; $v_{\max}$ — скорость истечения газа в вакуум; a_* — *критическая скорость*, т. е. такая скорость потока, которая равна соответствующей местной скорости звука.

Для воздуха при $k=1{,}4$ имеем: $a_*=0{,}913a_0$; $a_0=1{,}095a_*$; $v_{\max}=2{,}236a_0=2{,}449a_*$.

Наряду с числом $M=\frac{v}{a}$ часто употребляется *относительная скорость* $M_*=\frac{v}{a_*}$, обозначаемая также λ.

Число M и относительная скорость λ связаны соотношениями:

$$\lambda^2=\frac{(k+1)M^2}{2+(k-1)M^2};$$

$$M^2=\frac{2\lambda^2}{(k+1)-(k-1)\lambda^2}.$$

Для изэнтропических течений газа имеют место формулы:

$$\frac{p_0}{p}=\left(1+\frac{k-1}{2}M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}=$$

$$=\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda^2\right)^{-\frac{k}{k-1}};$$

$$\frac{\rho_0}{\rho}=\left(1+\frac{k-1}{2}M^2\right)^{\frac{1}{k-1}}=$$

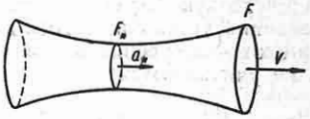
$$=\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda^2\right)^{-\frac{1}{k-1}};$$

$$\frac{T_0}{T}=1+\frac{k-1}{2}M^2=\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda^2\right)^{-1}.$$

Скоростной напор

$$q=\frac{1}{2}\rho v^2=\frac{1}{2}kpM^2.$$

Динамическим напором называется величина p_0-p, где p_0 — давление адиабатического торможения. Отношение



Фиг. 23.

динамического напора к скоростному напору определяется по формуле

$$\frac{p_0-p}{q}=\frac{2}{kM^2}\left[\left(1+\frac{k-1}{2}M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}-1\right].$$

При $k=1{,}4$

$$\frac{p_0-p}{q}=1+\frac{1}{4}M^2+\frac{1}{40}M^4+\frac{1}{1600}M^6+\ldots$$

Вдоль элементарной трубки тока (фиг. 23) уравнение неразрывности будет

$$\rho vF=\text{const},$$

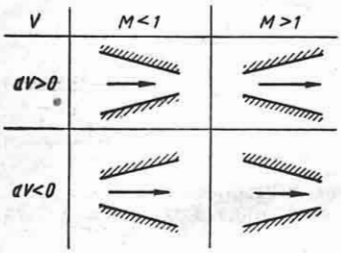
где F — площадь поперечного сечения трубки; в дифференциальной форме уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{d\rho}{\rho}+\frac{dv}{v}+\frac{dF}{F}=0$$

или

$$\frac{dF}{dv}=\frac{F}{v}(M^2-1).$$

Если $M<1$ (дозвуковой поток), то с уменьшением площади трубки ($dF<0$) скорость потока увеличивается; при $M>1$ (сверхзвуковой поток) с уменьшением площади трубки скорость потока уменьшается и, наоборот, с увеличением площади для дозвуковых потоков скорость течения газа вдоль трубки уменьшается, а для сверхзвуковых потоков она увеличивается (фиг. 24).



Фиг. 24.

При $M=1$ площадь поперечного сечения трубки имеет минимум; это сечение трубки тока называется *критическим* и обозначается F_*.

Значения параметров газа в критическом сечении трубки p_*, ρ_*, T_*, отнесенные к соответствующим значениям параметров адиабатически заторможенного газа p_0, ρ_0, T_0, определяются формулами:

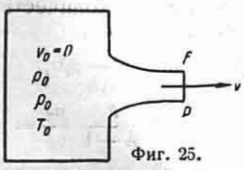
$$\frac{p_*}{p_0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$\frac{\rho_*}{\rho_0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}};\quad \frac{T_*}{T_0}=\frac{2}{k+1}.$$

Для воздуха при $k=1{,}4$:

$$\frac{p_*}{p_0}=0{,}528;\quad \frac{\rho_*}{\rho_0}=0{,}634;\quad \frac{T_*}{T_0}=0{,}833.$$

Истечение газа из большого сосуда. Пусть газ вытекает через сужающийся насадок из большого сосуда (фиг. 25) в пространство с давлением p. Обозначим через p_0, ρ_0 и T_0 параметры газа в сосуде и будем считать, что скорость газа в сосуде равна нулю.



Фиг. 25.

Если

$$\frac{p}{p_0}>\frac{p_*}{p_0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

то скорость истечения газа через выходное сечение насадка

$$v=\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}=$$

$$=v_{\max}\sqrt{1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Весовой расход находится по формуле

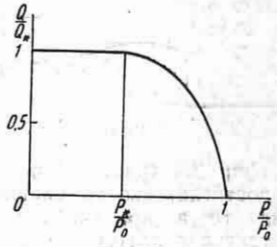
$$Q=F\sqrt{\frac{2k}{k-1}g\gamma_0 p_0\left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]},$$

где F — площадь выходного отверстия насадка; $\gamma_0=g\rho_0$ — вес 1 $м^3$ газа в сосуде.

Если

$$\frac{p}{p_0}\leqslant\frac{p_*}{p_0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

то скорость истечения будет равна скорости звука. В этом случае весовой



Фиг. 26.

расход не зависит от давления p и определяется по формуле (фиг. 26)

$$Q_*=F\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{2k}{k-1}g\gamma_0 p_0}.$$

Сопло Лаваля. Для того чтобы газ мог вытекать из сосуда с определенной сверхзвуковой скоростью, насадок должен иметь специальную форму. Насадок, служащий для получения сверхзвуковой скорости, называется *соплом Лаваля*.

Типичная форма сопла Лаваля показана на фиг. 27.

Зависимость между площадью поперечного сечения сопла, числом M и

давлением p в этом сечении определяется по формуле

$$F = \frac{Q}{\sqrt{\frac{2k}{k-1} g\gamma_0 p_0 \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}}$$

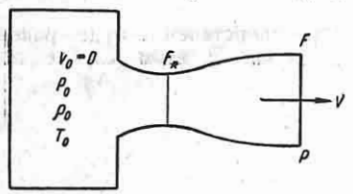
или

$$\left(\frac{F}{F_*}\right)^2 = \frac{k-1}{2} \frac{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} =$$

$$= \frac{1}{M^2} \left[\frac{2}{k+1}\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)\right]^{\frac{k+1}{k-1}},$$

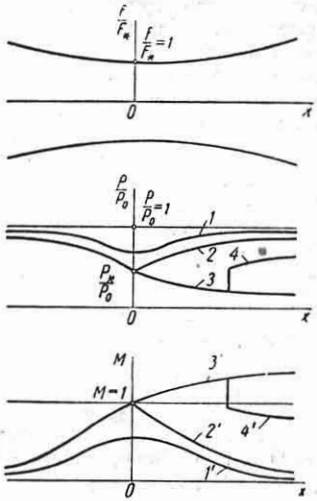
где F_* — площадь критического сечения сопла.

Если расход газа через сопло меньше своего максимального значения, то течение газа в сопле будет всюду дозвуковым (фиг. 28, кривые *1* и *1'*). Когда расход достигает своего максимального значения, то в критическом сечении сопла устанавливается звуковая скорость, а за критическим сечением сопла устанавливается или определенная дозвуковая, или определенная сверхзвуковая скорость в зависимости от давления на выходе из сопла (на фиг. 28 кривые *2* и *2'* соответствуют дозвуковому режиму, *3* и *3'* — сверхзвуковому режиму). Если давление на выходе при максимальном расходе ниже, чем требуется для существования сверхзвукового режима, то газ продолжает расширяться и по выходе из сопла. Если же давление на выходе выше, чем требуется для так называемого *расчетного сверхзвукового режима*, но ниже, чем требуется для дозвукового режима, то внутри сопла или на выходе образуется скачок уплотнения (фиг. 28, кривые *4* и *4'*), за которым режим будет дозвуковым.



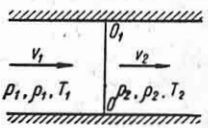
Фиг. 27.

Для получения на выходе из сопла сверхзвукового параллельного потока стенки сопла должны быть профилированы специальным образом.



Фиг. 28.

Прямой скачок уплотнения. Поверхность, при прохождении через которую давление, плотность, скорость и температура газа меняются скачком, называется *ударной волной*. Ударная волна, скорость распространения которой по частицам газа равна скорости газа перед ударной волной, называется *скачком уплотнения*.



Фиг. 29.

Если фронт скачка уплотнения перпендикулярен набегающему потоку, то скачок называется *прямым* (фиг. 29, где OO_1 — прямой скачок).

Все соотношения для прямого скачка уплотнения могут быть получены из уравнений неразрывности, количества движения и уравнения энергии:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2; \quad p_1 - p_2 = \rho_2 v_2^2 - \rho_1 v_1^2;$$

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1}\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{k}{k-1}\frac{p_2}{\rho_2} = \frac{k+1}{k-1}\frac{a_*^2}{2},$$

где индекс 1 соответствует состоянию газа перед скачком, а индекс 2 — состоянию газа за скачком.

Из этих уравнений можно получить

$$v_1 v_2 = a_*^2.$$

Сверхзвуковой поток после прямого скачка становится дозвуковым.

Зависимость отношения давлений $\frac{p_2}{p_1}$ от отношения плотностей $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ будет

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{(k+1)\rho_2 - (k-1)\rho_1}{(k+1)\rho_1 - (k-1)\rho_2}.$$

Это соотношение называется *ударной адиабатой*.

Величины изменения давления, плотности, температуры, скорости и энтропии газа при прохождении прямого скачка определяются формулами:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho_1 a_*^2 \left(\lambda_1^2 - 1\right);$$

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = \rho_1 \left(\lambda_1^2 - 1\right);$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = a_*^2 \frac{\lambda_1^4 - 1}{2Jc_p\lambda_1^2};$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 = a_* \frac{1 - \lambda_1^2}{\lambda_1};$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = C_v \ln\left[\frac{p_2}{p_1}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^k\right] =$$

$$= c_v \ln\left\{\left(\frac{2k}{k+1}M_1^2 - \frac{k-1}{k+1}\right)\left[\frac{2+(k-1)M_1^2}{(k+1)M_1^2}\right]^k\right\},$$

где

$$M_1^2 = \frac{v_1^2}{a_1^2} = \frac{2\lambda_1^2}{(k+1) - (k-1)\lambda_1^2}.$$

Число M_2 за скачком уплотнения определяется через число M_1 по формуле

$$M_2^2 = \frac{1 + \frac{k-1}{2}M_1^2}{kM_1^2 - \frac{k-1}{2}}.$$

Зависимость отношения давлений $\frac{p_2}{p_1}$ от числа M_1 будет

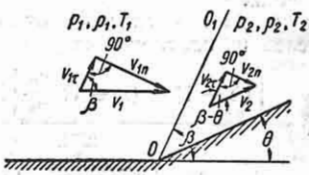
$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1}M_1^2 - \frac{k-1}{k+1}.$$

Давления торможения за скачком p_0' и давление торможения перед скачком p_0 связаны между собой соотношением

$$\boxed{\frac{p_0}{p_0'} = \left(\frac{2k}{k+1}M_1^2 - \frac{k-1}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\left[\frac{2+(k-1)M_1^2}{(k+1)M_1^2}\right]^{\frac{k}{k-1}}},$$

где M_1 — число M перед скачком.

Косой скачок уплотнения. Скачок уплотнения, фронт которого к потоку не перпендикулярен, называется *косым* (фиг. 30).



Фиг. 30.

Для косого скачка уплотнения имеем уравнения:

$$\rho_1 v_{1n} = \rho_2 v_{2n};$$

$$p_2 - p_1 = \rho_1 v_{1n}^2 - \rho_2 v_{2n}^2;$$

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1}\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} +$$

$$+ \frac{k}{k-1}\frac{p_2}{\rho_2} = \frac{k+1}{k-1}\frac{a_*^2}{2}.$$

Из этих уравнений можно получить соотношения:

$$v_{1\tau} = v_{2\tau} = v_\tau;$$

$$v_{1n} v_{2n} = a_*^2 - \frac{k-1}{k+1}v_\tau^2;$$

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{k+1}{k-1}\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}}\left\{\frac{4k\sin^2\beta}{(k+1)^2} - \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2\left[1 + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{4k\sin^2\beta}{(k-1)^2}\right]\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right\};$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{k+1}{k-1}\frac{\rho_1}{\rho_0}\frac{1 - \left(\frac{\rho_1}{\rho_0}\right)^{k-1}}{1 + \operatorname{ctg}^2\beta\left(\frac{\rho_1}{\rho_0}\right)^{k-1}};$$

$$\frac{T_2}{T_0}=\frac{1+\operatorname{ctg}^2\beta\,\dfrac{T_1}{T_0}\left\{\dfrac{4k\sin^2\beta}{(k+1)^2}-\right.}{1-\dfrac{T_1}{T_0}}$$

$$\left.-\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2\left[1+\frac{4k\sin^2\beta}{(k-1)^2}\,\frac{T_1}{T_0}\right]\right\}.$$

При $\beta=\frac{\pi}{2}$ получим соотношения для прямого скачка.

Уравнение ударной адиабаты остается справедливым и для косого скачка уплотнения.

Наклон косого скачка может быть определен из соотношения

$$\sin^2\beta=\frac{\left[(k-1)+(k+1)\dfrac{p_2}{p_1}\right](k-1)}{4k\left[\left(\dfrac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right]}.$$

Другие наиболее важные формулы для косого скачка уплотнения:

$$M_2^2=\frac{1+\dfrac{k-1}{2}M_1^2}{kM_1^2\sin^2\beta-\dfrac{k-1}{2}}+$$

$$+\frac{M_1^2\cos^2\beta}{1+\dfrac{k-1}{2}M_1^2\sin^2\beta};$$

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{2k}{k+1}M_1^2\sin^2\beta-\frac{k-1}{k+1}$$

и для давлений торможения

$$\frac{p_0}{p_0'}=\left[\frac{2k}{k+1}M_1^2\sin^2\beta-\frac{k-1}{k+1}\right]^{\frac{1}{k-1}}\times$$

$$\times\left[\frac{(k-1)M_1^2\sin^2\beta+2}{(k+1)M_1^2\sin^2\beta}\right]^{\frac{k}{k-1}}.$$

Кроме того, как для косого, так и для прямого скачков уплотнения для параметров торможения перед скачком (p_0, ρ_0, T_0, i_0) и за скачком (p_0', ρ_0', T_0', i_0') имеем

$$i_0=i_0';\quad T_0=T_0';$$

$$\frac{p_0}{\rho_0}=\frac{p_0'}{\rho_0'};\quad a_{1*}=a_{2*}=a_*.$$

При предельном переходе к бесконечно малым уплотнениям газа косой скачок уплотнения вырождается в волну возмущения, угол наклона которой α к направлению потока называется *углом возмущения* и определяется формулой

$$\sin\alpha=\frac{1}{M}$$

или

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{1}{\sqrt{M^2-1}}.$$

Угол наклона скачка уплотнения всегда больше угла возмущения.

Уравнение ударной адиабаты при предельном переходе к волне возмущения переходит в обычную адиабату

$$p=A\rho^k.$$

Ударная поляра. Ударная поляра позволяет графически изобразить связь между физическими и геометрическими величинами, определяющими косой скачок уплотнения. Эта поляра имеет большую наглядность и очень удобна для разных вычислительных целей.

С изменением угла θ при постоянном значении скорости v_1 до скачка будет изменяться и угол наклона скачка β, а также будет изменяться и значение вектора скорости $\bar{v}_2$ после скачка (фиг. 30).

При заданной скорости v_1 до скачка уплотнения может существовать бесконечное число векторов скорости $\bar{v}_2$ после скачка, зависящих от угла θ как от параметра.

Если из начала координат плоскости годографа скоростей отложить все векторы скорости $\bar{v}_2$, то концы этих векторов будут располагаться по кривой, которая обычно называется *ударной полярой или строфоидой*, соответствующей заданной скорости v_1 перед скачком.

Уравнение ударной поляры (фиг. 31):

$$\left(\xi-\frac{a_*^2}{v_1}\right)(v_1-\xi)^2=$$

$$=\eta^2\left(\frac{2}{k+1}v_1+\frac{a_*^2}{v_1}-\xi\right),$$

где $\xi=v_{2x}$; $\eta=v_{2y}$.

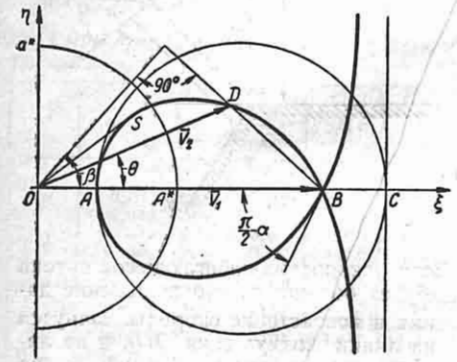
Ударная поляра полностью определяется постоянными v_1, a_*, т. е. ско-

ростью до скачка уплотнения и критической скоростью, которая при прохождении потока через скачок не меняется.

При $\eta = 0$ имеем

$$\xi_1 = OA = \frac{a_*^2}{v_1}; \quad \xi_2 = OB = v_1.$$

Точки пересечения A и B ударной поляры с осью абсцисс являются взаимно симметричными относительно окружности радиуса a_*, т. е. $OA \cdot OB = a_*^2$. Эта окружность пересекает ударную поляру и разделяет ее на две части.



Фиг. 31.

Первой части соответствуют скачки уплотнения с дозвуковой скоростью v_2 после скачка, а второй — скачки уплотнения со сверхзвуковой скоростью v_2 после скачка. Точке A соответствует прямой скачок уплотнения, перед этим скачком скорость $v_1 = OB$.

При $\eta \to \pm\infty$ имеем

$$\xi_3 = OC = \frac{a_*^2}{v_1} + \frac{2}{k+1} v_1.$$

Прямая, параллельная оси η и проходящая через точку C, является асимптотой ударной поляры.

Точка B называется узловой точкой ударной поляры. Две ветви ударной поляры, выходящие из узловой точки B и идущие к асимптоте, не имеют физического смысла, так как скачков разрежения не существует (скорость v_2 после скачка уплотнения не может быть больше скорости v_1 до скачка).

Направление скачка уплотнения будет перпендикулярно прямой, соединяющей концы векторов $\bar{v}_1$ и $\bar{v}_2$. При $D \to B$ скачок уплотнения превращается в слабый скачок уплотнения (в бесконечно малое адиабатическое уплотнение). В этом случае наклон скачка уплотнения β переходит в угол возмущения α, и обе касательные к ударной поляре в узловой точке B образуют с осью абсцисс ξ углы $\frac{\pi}{2} - \alpha$.

Критическим углом $\theta_к$ мы будем называть угол, который образует с осью абсцисс ξ касательная OS, проведенная к ударной поляре из точки O.

Точка касания S делит верхнюю ветвь ударной поляры на две дуги AS и SB.

При $\theta < \theta_к$ линия действия вектора скорости v_2 пересекает петлю ударной поляры в двух точках, т. е. при одном и том же угле θ, вообще говоря, могут быть два различных скачка уплотнения. Но опыт показывает, что при обтекании сверхзвуковым потоком газа клина (тела) с углом $\theta < \theta_к$ возникает в действительности только один косой скачок уплотнения, который соответствует точке пересечения D, находящейся на дуге SB ударной поляры. При $\theta > \theta_к$ линия действия вектора $\bar{v}_2$ не пересекает петлю ударной поляры. Этот случай соответствует обтеканию сверхзвуковым потоком газа клина (тела) с тупой носовой частью.

Отклонение потока от первоначального направления при обтекании тела с $\theta > \theta_к$ не может произойти путем скачка уплотнения, исходящего из носовой точки O тела, а этот скачок будет находиться впереди носовой части тела, на некотором расстоянии от точки O. При этом скачок уплотнения (ударная волна) представляет собой не прямую, а кривую линию, вдоль которой местный угол β пробегает все значения от $\frac{\pi}{2}$ до α.

Вдоль этой ударной волны, вообще говоря, существуют состояния, соответствующие всем точкам верхней части петли ударной поляры. Физическую реальность имеют только точки, находящиеся на дуге AS. Точка A соответствует прямому скачку уплотнения. После скачка уплотнения в окрестности носовой точки всегда образуется некоторая дозвуковая область.

Если построить ударные поляры (точнее—петли ударных поляр) для различных значений скорости v_1 ($a_* \leqslant v_1 \leqslant v_{\max}$), то получим *диаграмму (сетку) ударных поляр.*

При $v_1 = a_*$ петля ударной поляры вырождается в точку A^*, а при $v_1 = v_{max}$ переходит в окружность радиуса $AC = \frac{v_{max}}{k+1} = \frac{a_*}{\sqrt{k^2-1}}$. Все остальные петли ударных поляр находятся внутри этой окружности и содержат внутри себя точку A^*.

Измерение скоростей. Для измерения как дозвуковых, так и сверхзвуковых скоростей газа служат специальные насадки, измеряющие статическое давление и давление торможения.

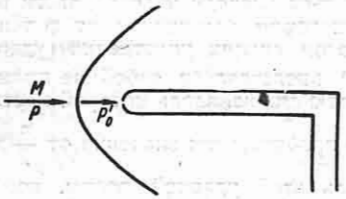
В дозвуковом потоке для определения числа M служит формула

$$M^2 = \frac{2}{k-1}\left[\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right].$$

В сверхзвуковом потоке вследствие образования перед насадком скачка уплотнения (фиг. 32) число M определяется по другой формуле:

$$\frac{p}{p_0'} = \frac{\left(\frac{2k}{k+1}M^2 - \frac{k-1}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(\frac{k+1}{2}M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}},$$

где p — статическое давление в набегающем потоке; p_0' — давление торможения, даваемое насадком.



Фиг. 32.

Число M в сверхзвуковом потоке газа может быть также определено с помощью фотографирования волн возмущения.

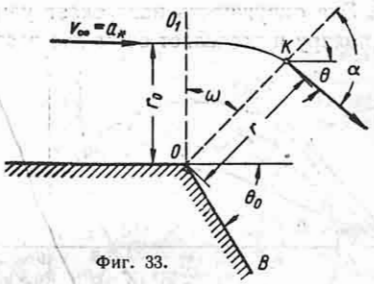
Обтекание выпуклых и вогнутых стенок. При обтекании выпуклого угла происходит непрерывное понижение давления и увеличение скорости до тех пор, пока направление потока не окажется параллельным стенке OB (фиг. 33).

В любой точке K с координатами r и ω радиальная v_r и трансверсальная v_ω составляющие скорости зависят только от угла ω:

$$v_r = v_{max}\sin\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right);$$

$$v_\omega = a_*\cos\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right),$$

где угол ω отсчитывается от линии возмущения, на которой $v_r = 0$ и $v_\omega = a_*$.



Фиг. 33.

Если скорость набегающего потока v_∞ будет больше a_*, то понижение давления и возрастание скорости начнутся не на линии возмущения OO_1, а на линии возмущения, лежащей ниже ее по течению.

Другие наиболее употребительные формулы для обтекания выпуклого угла при $v_\infty = a_*$:

$$\lambda^2 = 1 + \frac{2}{k-1}\sin^2\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right);$$

$$M^2 = \frac{(k+1) - 2\cos^2\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right)}{(k-1)\cos^2\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right)};$$

$$\frac{p_0}{p} = \left[\frac{k+1}{2}\,\frac{1}{\cos^2\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right)}\right]^{\frac{k}{k-1}}.$$

Угол возмущения α определяется из соотношения

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v_\omega}{v_r} = \sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\operatorname{ctg}\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right)$$

или

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \theta - \omega.$$

Уравнение линии тока

$$r = r_0\left[\cos\left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}}\,\omega\right)\right]^{-\frac{k+1}{k-1}}.$$

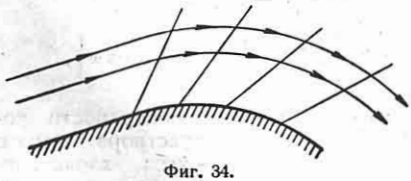
Угол отклонения вектора скорости от своего первоначального направления будет

$$\theta = \frac{1}{2}\arccos\left[k-(k+1)\lambda^{-2}\right] + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{k+1}{k-1}}\arccos\left[k-(k-1)\lambda^2\right] - \frac{\pi}{2}.$$

Значения θ, ω, α, $\frac{p}{p_0}$, M и λ для воздуха при $k = 1{,}4$ приведены в следующей таблице.

$\theta°$	$\omega°$	$\alpha°$	$\frac{p}{p_0}$	M	λ
0	0,00	90,00	0,527	1,000	1,000
2	30,04	61,96	0,449	1,133	1,107
4	38,88	55,12	0,401	1,220	1,173
6	45,42	50,58	0,363	1,295	1,227
8	50,93	47,07	0,329	1,366	1,276
10	55,84	44,16	0,298	1,435	1,322
12	60,38	41,62	0,270	1,505	1,366
14	64,52	39,48	0,245	1,572	1,407
16	68,47	37,53	0,221	1,641	1,448
18	72,18	35,82	0,199	1,710	1,486
20	75,74	34,26	0,179	1,779	1,523
22	79,20	32,80	0,161	1,850	1,559
24	82,55	31,45	0,145	1,918	1,592
26	85,81	30,19	0,130	1,989	1,625
28	89,02	28,98	0,116	2,062	1,657
30	92,12	27,88	0,104	2,135	1,688
32	95,18	26,82	0,092	2,214	1,720
34	98,20	25,80	0,080	2,296	1,752
36	101,13	24,87	0,071	2,378	1,781
38	104,02	23,98	0,062	2,466	1,810
40	106,88	23,12	0,054	2,550	1,837
42	109,71	22,29	0,047	2,640	1,864
44	112,51	21,49	0,041	2,734	1,891
46	115,27	20,73	0,036	2,826	1,917
48	118,00	20,00	0,031	2,920	1,939
50	120,71	19,29	0,027	3,021	1,963
52	123,41	18,59	0,023	3,131	1,987
54	126,03	17,97	0,019	3,250	2,012
129,32	219,32	0,00	0,000	∞	2,457

При обтекании вогнутого угла образуется косой скачок уплотнения. Параметры газа за косым скачком определяются по ранее приведенным формулам.



Фиг. 34.

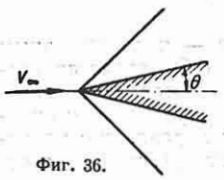
Обтекания выпуклой (фиг. 34) и вогнутой (фиг. 35) стенок могут быть рассчитаны путем разбиения стенок на участки, каждый из которых является

Фиг. 35.

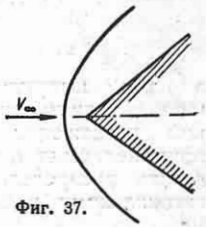
выпуклым или вогнутым углом, и последовательным применением приведенных выше формул для выпуклого и вогнутого углов.

Осевое обтекание клина может быть представлено как обтекание двух вогнутых углов (фиг. 36).

Если угол θ достаточно велик, то скачок уплотнения может отделиться от клина (фиг. 37).



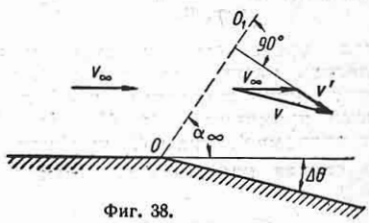
Фиг. 36.



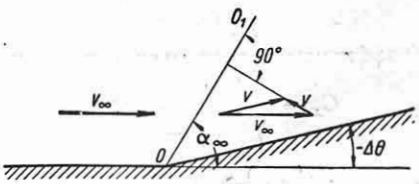
Фиг. 37.

Более сложные случаи плоских течений газа могут быть рассчитаны по так называемому *методу характеристик.*

Волновое сопротивление и подъемная сила профиля крыла. Для выпуклого и вогнутого углов, отличающихся на малый угол $\Delta\theta$ от 180°, можно



Фиг. 38.



Фиг. 39.

указать приближенную формулу для изменения давления при обтекании таких

углов (фиг. 38 и 39) сверхзвуковым потоком:

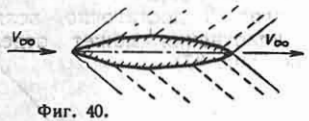
$$\Delta p = p - p_\infty = -\rho_\infty v_\infty^2 \operatorname{tg}\alpha_\infty \Delta\theta = -2q_\infty \operatorname{tg}\alpha_\infty \Delta\theta,$$

где индексом ∞ обозначены параметры набегающего потока; q_∞ — скоростной напор;

$$\operatorname{tg}\alpha_\infty = \frac{1}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}};$$

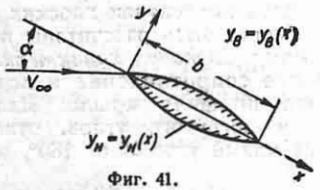
p — давление за линией возмущения.

Приведенная формула годна как для выпуклого, так и для вогнутого углов, только для вогнутого угла угол $\Delta\theta$ надо считать отрицательным (волна возмущения OO_1 является волной уплотнения),



Фиг. 40.

а для выпуклого — положительным (волна возмущения OO_1 является волной разрежения). Последовательным применением этой формулы можно определить распределение давления по полигональному профилю (фиг. 40), а со-



Фиг. 41.

вершая предельный переход, можно определить распределение давления по тонкому криволинейному профилю с острыми кромками (фиг. 41). Коэффициент подъемной силы C_y профиля для этого случая определяется по формуле

$$C_y = \frac{4\alpha}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}}.$$

Коэффициент волнового сопротивления

$$C_x = \frac{4}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}} \times \left\{ \alpha^2 + \frac{1}{2b} \int_0^b \left[\left(\frac{dy_в}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dy_н}{dx}\right)^2 \right] dx \right\},$$

где α — угол атаки; $M_\infty = \frac{v_\infty}{a_\infty}$ — число M набегающего потока; $y_в$, $y_н$ — соответственно ординаты верхней и нижней частей профиля; b — длина хорды профиля.

При заданном угле атаки α и числе M_∞ все сверхзвуковые профили по линейной теории имеют одинаковый коэффициент подъемной силы

$$C_y = \frac{4\alpha}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}}.$$

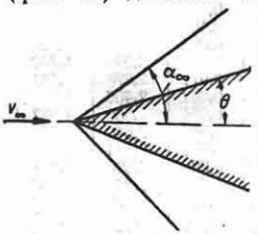
Коэффициент волнового сопротивления зависит от формы профиля и имеет наименьшее значение для пластинки.

Значение C_x для пластинки будет

$$C_x = \frac{4\alpha^2}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}}.$$

При угле атаки $\alpha = 0$ любой профиль по линеаризованной теории дает коэффициент подъемной силы $C_y = 0$, однако коэффициент волнового сопротивления C_x равен нулю только для пластинки.

Приближенная теория обтекания конуса. По приближенной (линеаризованной) теории обтекания конуса (фиг. 42) давление на поверхности ко-



Фиг. 42.

Фиг. 43.

нуса может быть определено по приближенной формуле

$$\Delta p = p - p_\infty = \frac{\rho_\infty v_\infty^2}{2} \times \left[2\theta^2 \ln\left(\frac{1}{\theta}\right) - 4\alpha\theta\cos\omega \right],$$

где p — давление на поверхности конуса; θ — угол полураствора конуса; α — угол атаки; ω — угол, характеризующий меридиональную плоскость (фиг. 43); индекс ∞ указывает на параметры набегающего потока.

Давление на поверхности конуса зависит только от угла раствора конуса и угла атаки и является постоянным на каждой из образующих конуса. Обтекание произвольного заостренного тела вращения может быть приближенно рассмотрено как последовательное обтекание ряда конусов. Более точные результаты по обтеканию конуса сверхзвуковым потоком газа даются обычно в виде таблиц, так как в замкнутом виде решения не существует.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Жуковский Н. Е., Гидродинамика. Собр. соч., ОНТИ, т. II, 1935; т. III, 1936; т. VII, 1937; т. IV, 1937.
2. Зауэр Э., Введение в газовую динамику, Гостехиздат, 1947.
3. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В., Теоретическая гидромеханика, ГОНТИ, 1940.
4. Липман и Пакет, Введение в аэродинамику сжимаемой жидкости, ИЛ, 1949.
5. Павловский Н. Н., Гидравлический справочник, ОНТИ, 1937.
6. Прандтль-Титьенс, Гидро- и аэромеханика, ОНТИ, 1935.
7. Франкль Ф. И., Христианович С. А. и Алексеева О. А., Основы газовой динамики, ЦАГИ, 1938.
8. Юрьев Б. Н., Экспериментальная аэродинамика, ОНТИ, 1938.
9. Паничкин И. А., Некоторые задачи газовой динамики, ч. 1, НИИ, 1953.

ПРЕДМЕТНЫЙ АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютная температура 2
Абсорбционные холодильные машины — см. *Холодильные машины абсорбционные*
Авогадро закон 45
Автотрансформаторы 393
Автоэлектронная эмиссия 360
Агенты холодильные — см. *Холодильные агенты*
Адиабатический процесс 48, 520
Адиабатическое истечение газа 90
—— жидкости 90
Адиабатическое расширение газов 49
Азот — Растворимость в чистых металлах 323
— Тепловые свойства 20, 21
Азот-закись — Тепловые свойства 28
Азот-окись — Тепловые свойства 25
Аккумуляторные батареи свинцовые стартерные 358
Аккумуляторы 357
— К. п. д. 357
— Напряжение — Изменение при заряде и разряде 357
— Отдача 358
Аккумуляторы кислотные — Кривые заряда и разряда 357
—— свинцовые (кислотные) 357
—— свинцовые для стационарных установок 358
—— щелочные 359; — Характеристика электрические 360
Аксиальные счетчики скоростные 497
Активная составляющая тока 340
Акустика 254—268
Акустические материалы — Коэффициент звукопоглощения 260
Акустические фильтры 268
Акустические явления — Слуховое восприятие 256
Аммиак — Свойства 97, 98
Амортизационные пружины 266
Амортизация 266
Амперметры — Включение — Схема 373
Амплидины 388
Ангидрид сернистый — Пары насыщенные — Свойства 97, 99
— Тепловые свойства 29
Анионитовые фильтры — Регенерация 202
Антрацит донецкий — Классификация по размеру кусков 177
Апохроматы 243
Аппаратура сигнализации 436
—— электрическая 433—448
Аппараты — Обозначения в элементных схемах 437
— Элементы — Графические символы 438
Апретурные диафрагмы 233
Апретурные лучи 234
Апретурные углы 233
Арона схема включения ваттметра через измерительные трансформаторы 374
Архимеда закон 459
Асинхронные двигатели — Механические характеристики 415
— Мощность — Снижение в зависимости от исполнения 379
— Пуск 417
— Пусковые сопротивления — Расчет 415
— Регулирование скорости 419
— Торможение 415
Асинхронные двигатели крапово-металлургические МТ и МТК — Характеристики 416
—— однофазные 397
—— с двойной клеткой Доливо-Добровольского 396
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором 395
— Допустимая частота включений — Определение 430
— Расчет пусковых сопротивлений 418
— Схемы типовые 439
— Характеристики пусковые 406
— Частота включений — Определение 430
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором для повторно-кратковременного режима работы серии МТК — Технические данные 397, 402, 405
—— с короткозамкнутым ротором серии А — Технические данные 396
—— с фазовым ротором — Расчет

пусковых сопротивлений 418; — Управление контакторное 441
—— с фазовым ротором для повторно-кратковременного режима работы серии МТ — Технические данные 397, 400, 401
—— с фазовым ротором и контактными кольцами 395
—— со специальным ротором 395
Асинхронные двигатели трехфазные 393
— Поле вращающееся 394
— Принцип действия 394
— Роторные обмотки — Выводы — Обозначения 395
— Скольжение 394
— Скорость синхронная 394
— Статорные обмотки — Выводы — Обозначение 396
— Технические данные 396
— Устройство 395
Атомные константы 271
Атомный вес 271
Атомный радиус чистых металлов 319
Атомы — Радиусы 273, 276
— Сродство к электрону 273, 279
— Строение 271
— Число в элементарной ячейке чистых металлов 319
— Электроотрицательность 273
Атомы невозбужденные — Электронные оболочки — Строение 272
Ахроматические клинья 230
Ахроматические окуляры 241
Ахроматы 243
Ацетилен — Тепловые свойства 34
Аэродинамические коэффициенты 518

Б

Базена формула 485
Барометры 455
Батареи 356
—— аккумуляторные — Заряд 358
—— аккумуляторные свинцовые стартерные 358
Батарейные манометры 456
Бензол — Тепловые свойства 35
Бернулли уравнение 463, 464, 465, 498, 505, 519, 520
Бикарбонат 202
Бинарные установки ртутно-водяные — Схема 95
Бинарные циклы паросиловых установок 95
Бинокли — Объективы 240
Био критерий 130
Био-Фурье закон 116
Блазиуса формула 471
Бойля-Мариотта уравнение 44
Больцмана постоянная 153
Бринеля микроскопы 252
Бурые угли — см. *Угли бурые*
Бутадиен — Тепловые свойства 34

В

Вакуум — Измерение 455
Вакуумметры 456
—— жидкостные 11
Ван-дер-Ваальса уравнение 38, 60
Ваттметры — Включение — Схема 373, 374
Величины электрические — Приборы для их измерения 370
Вентили 490
— Коэффициент сопротивления 490
Вес удельный — см. *Удельный вес*
Весы кольцевые 457
Вещества горючие — см. *Горючие вещества*
Взаимоиндукция 333
Вибрационная звукопередача 263
Винтовые окуляр-микрометры 245
Виньетирование 233
Вихревая нить 513
—— прямолинейная 514
Вихревая линия 504
Вихревая трубка 504
Вихревое движение жидкости 513
Вихревые токи 333
Вихрь скорости 504
—— точечный 508
Включение полупроводниковых выпрямителей — Схема 369
Влага — Содержание в углях — Расчет 178
Влагосодержание влажного воздуха весовое 107, 109
Влажный воздух — см. *Воздух влажный*
Вода 193—203
— Вязкость 142, 452
— Деаэрация 202
— Жесткость 193
— Качество — Нормы 193, 194, 195
— — Показатели 193
— — Улучшение 195
— Коагуляция 197
— Коэффициент вязкости динамический 142, 452
— Коэффициент вязкости кинематический 452
— Коэффициент теплопроводности 123
— Модуль упругости 451
— Обескислороживание 202
— Обессоливание 202
— Окисляемость 193
— Осветление 196
— Очистка известковая 199
— Очистка от масла 203

— Параметры физические на кривой насыщения 141
— Применение в качестве холодильного агента 103
— Прозрачность 193
— Состав 193
— Сухой остаток 193
— Тепловые свойства 72
— Теплоемкость 18
— Удельный вес 449, 450
— Удельный объем 72
— Умягчение ионным обменом 200
— Умягчение химическое 197
— Фильтрация 195
Вода морская — Солевой состав 195
—— океанов — Солевой состав 195
—— питательная — Качество — Нормы 195
—— природная 193; — Загрязнение — Классификация веществ 193
—— речная — Анализы 195
Водоизмещение — Центр 459
—— объемное 459
Водоналивные элементы 356
Водоочистные установки 196
—— известковые — Схема 199
—— коагуляционные прямоточные 197
—— коагуляционные с отстойником 197
Водород — Растворимость в металлах 322
— Тепловые свойства 23
Водосливы 484
Водоумягчители содо-известковые 199
Водохранилища — Опорожнение 483
Водяной пар — см. *Пар*
Возгонка 38
Воздух — Тепловые свойства 22
Воздух влажный 107
— Влагосодержание 107
— Газовая постоянная 111
— i — d-диаграмма 111
— Объем на 1 *кг* сухого воздуха 109
— Удельный вес 110
— Энтальпия 110, 111
Воздух сжатый — Температура 57
—— сухой — Параметры физические 142
Вольтамперные характеристики фотоэлемента 364
Вольтметры — Включение — Схема 373
Вольтодобавочные машины — Определение 378
Воспламеняемость горючих веществ — Средства тушения 312
Вукаловича уравнение 62
Вход в трубу из резервуара 486
Выводы обмоток — Обозначения 382
—— роторных — Обозначения 395
—— статорных — Обозначения 396
Выключатели 433, 435
Выпрямители двухполупериодные на двуханодном кенотроне 361, 362
—— двухполупериодные на двух диодах — Схема 361
—— однополупериодные — Схема 361
—— переменного тока в постоянный 361
Выпрямители полупроводниковые 368
— Напряжения допустимые 369
— Схемы включения 369
— Токи 369
— Характеристики внешние 369
Выпрямители ртутные 367 — см. также *Игнитроны*
Выпрямительные схемы — Характеристика 370
Вязкость 450; — Величины — Соотношения в различных единицах 451
—— воды — Коэффициент динамический 142, 452; — Коэффициент кинематический 452
—— газов — Коэффициент динамический 143
—— жидкостей 452, 453
—— масел 452
—— нефтепродуктов 452, 453
Воздушные смазки — см. *Смазки воздушные*
Волны звуковые — см. *Звуковые волны*
Вязкость чистых металлов 318

Г

Газ — см. также *Газы*
— Истечение из большого сосуда 521
— Скорость — Измерение 526
— Уравнения движения 519
Газ воздушной продувки 192
—— генераторный 192
—— доменный 192
—— коксовых печей 192
—— природный 192
—— углекислый — Тепловые свойства 27
Газификация топлива 174
Газовая динамика 519
Газовая постоянная 39, 519
—— влажного воздуха 111
—— газовой смеси 46
Газовые двигатели — см. *Двигатели газовые*
Газовые процессы — 47 — см. также по их названиям, например, *Адиабатический процесс; Изобарический процесс; Изотермический процесс; Изохорический процесс; Политропический процесс*
Газовые смеси 45
Газовый поток — см. *Поток газовый*
Газогенераторный процесс 174
Газообразное топливо — см. *Топливо газообразное*

Газопроводы — Гидравлический расчет 475
Газотроны 365
— Параметры 366
Газоходы котлоагрегатов — Теплообмен — Расчет 163
Газы — Вязкость — Коэффициент динамический 143
— Горение — Максимальные температуры пламени 312
— Границы воспламенения 313
— Дросселирование 92
— Истечение 90
— Кинетическая теория — Уравнения 44
— Константы равновесия 310
— Коэффициент давления 17
— Коэффициент объемного расширения 17, 140.
— Коэффициент теплопроводности 124
— Параметры критические 38, 39
— Расширение адиабатическое 49
— Расширение политропическое 49
— Скорость распространения пламени 313
— Степень черноты 163
— Теплоемкость 17, 18, 19—35
— Теплота — Определение по теплоемкостям 18
— Турбулентное течение — Теплоотдача 144
— Характеристики тепловые 39
— Энтальпия 19—35
— Энтропия 19—35
Газы идеальные 44
— Теплоемкость 17
— Теплосодержание 519; — Энтропия 520
Газы реальные 59
— Теплоемкость 17
Галилея телескопическая система 240
Гальванические элементы 356
Гаусса теорема 330
Гей-Люссака уравнение 44
Генераторный газ 192
Генераторы — Напряжения номинальные 380
Генераторы постоянного тока — Напряжение — Регулирование 384
— Параллельная работа 385
— Применение 381
— Самовозбуждение 384
— Характеристики 384
Генераторы электрические — Определение 378
Геометрическая оптика 228
Гидравлика 449—502
Гидравлический расчет — см. под соответствующими названиями с подрубрикой — Гидравлический расчет: например, *Нефтепроводы* — Гидравлический расчет; *Теплообменники* — Гидравлический расчет
Гидравлический удар в трубах 492
Гидравлический уклон 464
Гидроаэрогазодинамика 503—529
Гидроаэродинамика 503
Гидроксильная группа ОН — Тепловые свойства 26
Гидростатическое взвешивание — Применение для определения удельного объема 13, 15
Гистерезис 335
Глауконит — Характеристика 200
Глушение вентиляционных шумов 267
— шума выхлопа 268
Глушители реактивные 268
Голубинского формула 150
Гомали окуляры 245
Горение — Количество необходимого кислорода — Определение 171
— Процессы — Расчет 171
— Теория — Расчет 170—175
Горючие вещества — Воспламеняемость 312
— Средства тушения 312
— Температура пламени 312
Горючие сланцы — *см. Сланцы горючие*
ГОСТ 32-53 211, 453
ГОСТ 176-50 210
ГОСТ 183-41 382, 406
ГОСТ 542-50 211
ГОСТ 610-48 213
ГОСТ 721-41 380
ГОСТ 782-53 215
ГОСТ 802-54 334
ГОСТ 825-41 358
ГОСТ 903-41 202
ГОСТ 959-51 358
ГОСТ 973-50 213
ГОСТ 982-53 453
ГОСТ 1013-49 453
ГОСТ 1033-45 216
ГОСТ 1174-51 200
ГОСТ 1519-42 209
ГОСТ 1631-52 217
ГОСТ 1642-50 213, 453
ГОСТ 1666-51 206, 453
ГОСТ 1707-51 207, 453
ГОСТ 1805-51 210
ГОСТ 1840-51 206
ГОСТ 1841-51 214, 453
ГОСТ 1845-52 371
ГОСТ 1861-54 211, 453
ГОСТ 1862-51 204, 209
ГОСТ 1957-52 217
ГОСТ 2022-51 213
ГОСТ 2156-52 202
ГОСТ 2184-43 202

ГОСТ 2263-43 200
ГОСТ 2405-52 12
ГОСТ 2712-52 219
ГОСТ 2854-51 204, 207
ГОСТ 2874-54 194
ГОСТ 2931-51 217
ГОСТ 2967-52 215
ГОСТ 3005-51 215
ГОСТ 3043-53 373
ГОСТ 3045-51 220
ГОСТ 3146-53 216
ГОСТ 3257-53 218
ГОСТ 3275-46 216
ГОСТ 3276-54 215
ГОСТ 3333-46 216
ГОСТ 3351-46 193
ГОСТ 3469-46 242
ГОСТ 3781-53 211
ГОСТ 3823-54 219
ГОСТ 3829-51 208
ГОСТ 3894-47 359
ГОСТ 3895-47 360
ГОСТ 4002-53 212
ГОСТ 4003-53 212
ГОСТ 4105-48 207
ГОСТ 4366-50 216
ГОСТ 4402-48 336
ГОСТ 4593-49 207
ГОСТ 4700-49 220, 223
ГОСТ 4733-49 218
ГОСТ 4749-49 453
ГОСТ 4874-49 218
ГОСТ 4952-49 218
ГОСТ 5100-49 200
ГОСТ 5287-50 177
ГОСТ 5303-50 208
ГОСТ 5304-54 209, 453
ГОСТ 5490-50 359
ГОСТ 5491-50 360
ГОСТ 5519-50 210
ГОСТ 5546-54 210
ГОСТ 5570-50 218
ГОСТ 5634-51 177
ГОСТ 5649-51 218
ГОСТ 5656-51 220
ГОСТ 5660-51 210
ГОСТ 5699-51 220
ГОСТ 5702-51 220
ГОСТ 5703-51 217
ГОСТ 5730-51 219
ГОСТ 6055-51 194
ГОСТ 6267-52 217
ГОСТ 6411-52 214
ГОСТ 6457-53 205, 209
ГОСТ 6480-53 213
ГОСТ 6862-54 336
ГОСТ 6981-54 197
Градиент температуры 116
Грасгофа критерий подъемной силы 140
График видности 225
—— яркости светящихся составов 226
Гребни водосливов 484
Громека уравнение 505
Громкость 256
Гухмана и Илюхина формула 145
Гюйгенса окуляры 244

Д

Давление 9; — Измерение 10, 455
—— в жидкости 454
—— газовых смесей после смешения 45
—— жидкости на стенку — Определение 457
—— паров химических элементов 321
Дальтона закон 45
Даниеля элемент 356
Двигатели газовые — Циклы 50
—— поршневые — Циклы 51
Двигатели постоянного тока 381
— Механические характеристики 410
— Пуск 385
— Расчет сопротивлений 410
— Реверс 385
— Система управления и регулирования 420
— Схемы 442
Двигатели постоянного тока ПН — Технические данные 385
—— крапово-подъемные КПДН — Технические данные 388
—— металлургические МП 388
—— последовательного возбуждения — Расчет пусковых сопротивлений 414; — Схема реверсивного управления 443; — Характеристики 412
—— последовательного возбуждения металлургической серии МП — Характеристики 413
—— с параллельным возбуждением — Механическая характеристика 410; — Расчет пусковых сопротивлений 411; — Регулировочные свойства 412; — Схема нереверсивного управления 442
—— смешанного возбуждения — Расчет пусковых сопротивлений 414; — Торможение динамическое 415; — Характеристики 414
—— смешанного возбуждения металлургической серии МП — Характеристики 414
Двигатели реактивные — Циклы 55
—— реактивные газотурбинные — Циклы 56
—— электрические — см. *Электродвигатели*
Двигатель-генераторы — Определение 378

Движение жидкости 143, 467, 503, 507, 512
Двухэлектродные вакуумные лампы — см. *Диоды*; *Кенотроны*
Деаэраторы 202
Деаэрация воды 202
Дегазация воды 202
Делительные головки оптические 250
Деполяризаторы 356
Детонационное горение 174
Дефектоскопия ультразвуковая 255
Джоуля-Томсона эффект 92
Диаграмма *i-d* Рамзина 111
—— *p-v* 38
—— *p-t* 38
—— ударных поляр 525
Диаграммы векторные напряжений 340
Диафрагмы 494; — Коэффициент расхода 494; — Применение 233
—— апретурные 233
Дивергенция 504
Динамика электропривода 421
Диоды 360
— Вольтамперные характеристики 361
— Параметры 361, 362
Диоптрия 233
Диполь 508, 512
Дисковые затворы — см. *Затворы дисковые*
Дисперсия света 230
Диссоциация продуктов горения 175
—— электролитическая 354
Дифференциальное уравнение эффекта Джоуля-Томсона 92
Дифференциальные манометры 11, 456
Дифференциальные уравнения теплопроводности 116
—— термодинамики 43
Дифракция света 228
Диффузия металлов в металлах 313
Диффузоры 486
— Коэффициент потерь 487
— Определение 90
Дихлорметан — Свойства 97
Доливо-Добровольского асинхронные двигатели с двойной клеткой 396
Доменный газ 192
Дренажные колпачки 196
Дрова — Характеристики физико-химические 184
Дросселирование газа и пара 92
Дроссельные затворы — см. *Затворы дисковые*

Е

Единицы вязкости — Соотношения 451
—— давления 455
—— измерения абсолютной практической рационализированной системы 328
—— измерения магнитные 329
—— измерения механические 328
—— измерения электрические 328
—— мощности общетехнические — Соотношение с электрическими 330
—— мощности электрические — Соотношение с общетехническими 330
—— работы электрические — Соотношение с общетехническими 330
—— световых величин 224
—— энергии электрические — Соотношение с общетехническими 330
Емкость конденсатора 331
—— щелочных аккумуляторов 359

Ж

Жесткость — Единицы измерения — Пересчет в миллиграммэквиваленты — Таблица 194
—— воды 193
Жидкое топливо — см. *Топливо жидкое*
Жидкости — см. также *Жидкость реальная*
— Давление 454
— Давление всасывания перед насосом при равноускоренном движении системы по горизонтали 467
— Давление на стенку — Определение 457
— Движение — Изучение 503
— Движение безвихревое плоское 507
— Движение безвихревое пространственное 512
— Движение в трубопроводах 467
— Движение в трубопроводах турбулентное 470
— Движение в щелях 467
— Движение вихревое 513
— Движение вынужденное — Теплоотдача 143
— Движение потенциальное 506
— Движение равномерное безнапорное 476
— Движение равномерное напорное 467
— Движение установившееся относительно поступательно и равноускоренно движущейся системы отсчета 467
— Истечение — Скорость 90
— Истечение адиабатическое 90
— Истечение из равномерно вращающегося сосуда 466
— Истечение под переменным напором 483
— Истечение при равноускоренном движении сосуда по вертикали 467
— Истечение через насадки 478
— Истечение через отверстия 478
— Истечение через равномерно вращающуюся трубку 466

— Истечение через щели 482
— Кипение — Теплоотдача 148
— Коэффициент объемного расширения 15, 140
— Коэффициент теплопроводности 123
— Объемный модуль упругости 450
— Поверхностное натяжение 454
— Покой относительный 460, 461, 462
— Поток ламинарный в кольцевой трубе 469
— Поток ламинарный в круглой трубе 467
— Поток ламинарный в плоской щели 468
— Поток ламинарный в прямоугольной трубе 469
— Поток ламинарный в треугольной трубе 469
— Поток ламинарный через кольцевую щель 469
— Режим ламинарный равномерного напорного движения 467
— Режим турбулентный напорного равномерного движения 470
— Свойства 449
— Теплоотдача при течении в трубах и каналах 143
— Теплота 61
— Течение ламинарное круговое между неподвижным и вращающимся цилиндрами 470
— Течение турбулентное — Теплоотдача 144
— Удельный вес 450
— Удельный объем — Определение 15
— Циркуляция скорости 504
Жидкости вязкие — Движение — Условия граничные 515
— Движение — Закон подобия 516
— Движение — Условия начальные 515
— Уравнение движения 514
Жидкости капельные — Коэффициент вязкости динамический 452
Жидкости твердые — Температура плавления 38
Жидкостные вакуумметры 11
Жидкостные дифманометры 11
Жидкостные манометры 10, 456
Жидкостные приборы для измерения давления 10, 456
Жидкость реальная — Уравнение для потока 463
— Движение установившееся относительное — Уравнение потока 465
— Неустановившееся движение — Уравнение потока 464
Жуковского руль 511
Жуковского симметричный профиль 511
Жуковского формула 493
Жуковского функция 511

З

Задача о трех резервуарах — Графическое решение 500
Задвижки 490
— Коэффициент сопротивления 490
Закон Авогадро 45
—— Архимеда 459
—— Био-Фурье 116
—— Дальтона 45
—— Кулона 330
—— Ламберта 156
—— Ленца 333
—— Ленца-Джоуля 338
—— Ньютона-Рихмана 125
—— Ома для магнитной цепи 337
—— Ома для цепей переменного тока 340
—— Ома для цепей постоянного тока 337
—— Ома для электролитов 354
—— Паскаля 455
—— Пуазейля 467
—— Стефана-Больцмана 153
—— Фарадея 356
—— магнитной цепи 337
—— отражения света 228
—— периодический 269
—— полного тока 332
—— преломления света 228
—— соответственных состояний 60
—— термодинамический второй 41
—— термодинамический первый 40
Законы Кирхгофа 338
Замкнутая система 160
Запорные устройства 490
Заряд конденсатора 331
—— пространственный 360
Заряды аккумуляторных батарей 358
Затворы дисковые 490; — Коэффициент сопротивления 491
—— конусные 491; — Коэффициент сопротивления 491
Звук — Отражение 259
— Поглощение 259
— Физические характеристики 254
Звуки сложные 258
Звуковая тень 255
Звуковые волны — Длины 255
Звуковые спектры 258
Звукоизоляция 263, 267
Звукопередача вибрационная 263
Звукопоглотители резонансные 261
Звукопоглощение резонансное 261
Звукопроводность 259
Зеркала параллельные — Прохождение луча 229
—— плоские — Схема отражения луча 229
Зеркально-линзовые объективы 244

И

Игнитроны 368
— Параметры 368
— Схема управления 368
Идеальные газы — см. *Газы идеальные*
Известь — Характеристика 200
Излучение материалов полное — Степень черноты 154
—— металлов полное — Степень черноты 154
—— полусферическое — Плотность 153
—— тепловое 114
Измерение скоростей газа 526
—— сопротивлений тока 374
—— электрических величин — Методы 373
Измерительные приборы — см. также *Приборы для измерения давления*
—— для определения микротвердости 252
—— оптические 249
Изобарический процесс 47
Изображение в оптической системе — Построение 231
Изоляционные материалы — Коэффициент теплопроводности 119
— Объемный вес 119
— Свойства 343
Изотермический процесс 47
Изотопы радиоактивные — Применение в качестве индикаторов 273, 279
Изохорический процесс 47
Изэнтропический процесс 520
Индикаторы радиоактивные — Применение радиоактивных изотопов 273, 279
Индукция электромагнитная 332
Индустриальные смазки — см. *Смазки индустриальные*
Интегралы уравнения движения 505
Интенсивность звука — Восприятие 256
—— спектральная 153
Интерференция света 226
Ионизация — Потенциалы 273, 277
Ионные приборы 365 — см. также *Выпрямители; Газотроны; Игнитроны; Тиратроны*
Ионы — Радиусы 273, 276
Искусственный холод — см. *Холод искусственный*
Испарители 202
Истечение газа 90, 521
—— жидкости 90, 467, 478, 482
—— пара 91
Источники потока 508, 512
—— света — Яркость 225
—— тока химические 356

К

Кабели контрольные — Конструктивные данные 347
—— с винилитовой изоляцией — Характеристика 344
—— с резиновой изоляцией — Допустимые нагрузки 351; — Конструктивные данные 346; — Характеристика 344
—— силовые — Конструктивные данные 346
Кавитация 464
Кальцинированная сода — Состав 200
Каменный уголь — см. *Угли*
Камеры киносъемочные 247, 249
—— штативные 245, 248
Каналы — Гидравлический расчет 476
— Коэффициент шероховатости 477
— Сила действия потока на стенки — Определение 500
Капиллярность 453
Карно цикл 51
Катионирование H-Na последовательное 201
Катионит-Н — Регенерация 201
Катионитовые материалы — Характеристика 200, 202
Каустическая сода — Состав 200
Квадранты оптические 252
Кварцевые объективы 244
Кгм — Выражение в *ккал* 330
Кельнера окуляры 245
Кенотроны 360
Кеплера телескопическая система 240
Киловатт — Выражение в лошадиных силах 330
Кинокамеры для скоростной съемки 249
Киносъемочные камеры 247, 249
Кирпичева и Гухмана теорема 115
Кирхгофа законы 338
Кислород — Растворимость в металлах 323
— Тепловые свойства 19
Кислотные аккумуляторы — см. *Аккумуляторы свинцовые*
Ккал — Выражение в *квт-ч* 330
Клапаны — Коэффициент сопротивления 492
— Сопротивление 491
Клапейрона уравнение 45
Клапейрона-Клаузиуса уравнение 62
Клинья ахроматические 230
Коагуляция воды 197
Кокс — Характеристика 181
Колебательные контуры 341
Колена трубопроводов 488
— Коэффициент сопротивления 488, 489
Коллекторные двигатели с сериесным возбуждением 409

Коллекторы 382
Коллоидные смазки — см. *Смазки коллоидные*
Колпачки дренажные 196
Кольцо — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Командоаппараты 436
Коммутация 382
Компараторы 251
Компаундные машины — см. *Машины постоянного тока со смешанным возбуждением*
Компенсационные обмотки 382
Компенсационные окуляры 244
Компрессионные холодильные машины — см. *Холодильные машины компрессионные*
Компенсаторы — Определение 378
Компрессоры многоступенчатые 58
—— одноцилиндровые — Сжатие 57
Конакова формула 471
Конвективная теплоотдача 114
Конвективный теплообмен — см. *Теплообмен конвективный*
Конвекция тепловая 114
Конденсаторные двигатели однофазные 404
Конденсаторы 331
Конденсоры темного поля 252
Консистентные смазки — см. *Смазки консистентные*
Константы равновесия в газовой фазе 310
Контакторное управление асинхронными двигателями с фазовым ротором 441
Контакторы 434
— Обозначение в элементных схемах 437
Контроллеры 434
Контуры колебательные — см. *Колебательные контуры*
Конус — Обтекание 528
Конусные затворы — см. *Затворы конусные*
Конформное отображение 510
Конфузоры 487
Корни характеристического уравнения $\varepsilon_n J_1(\varepsilon_n) = \mathrm{Bi} J_0(\varepsilon_n)$ 133

$$-\operatorname{ctg}\varepsilon_n = \frac{t_n}{\mathrm{Bi}}$$ 130

$$-\operatorname{tg}\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_n}{\mathrm{Bi}-1}$$ 137

Короткое замыкание цепи с индуктивностью и сопротивлением 334
cos φ — Определение 380
Котельные агрегаты — Теплообмен излучением в газоходах — Расчет 163
Коэффициент аэродинамический 518
—— боковой силы 519
—— вязкости воды динамический 142, 452
—— вязкости воды кинематический 452
—— вязкости газов динамический 143
—— вязкости динамический 451
—— вязкости капельных жидкостей динамический 452
—— вязкости кинематический 451
—— вязкости пара 142
—— давления газов 17
—— диффузии 313
—— для расчета охлаждения или нагревания пластин 131
—— для расчета охлаждения или нагревания цилиндров 134
—— добротности полупроводниковых выпрямителей 368
—— звукопоглощения 259, 260
—— звукопроводности 259
—— кинетической энергии потока 463
—— кривизны цилиндрических стенок 127
—— линейного расширения металлов 15
—— линейного расширения сплавов 15
—— линейного расширения твердых тел 15
—— лобового сопротивления 518
—— момента крена 518
—— момента рысканья 518
—— момента тангажа 518
—— мощности номинальный электрических машин 380
—— нормальной силы 518
—— объемного расширения газов 17
—— объемного расширения жидкостей 15
—— объемного расширения жидкости (газа) температурный 140
—— отражения 153
—— отражения звука 259
—— перевода для расчета рекуперативных теплообменников 165
—— поглощения 152
—— подъемной силы 518
—— поперечной силы 518
—— потерь диффузора 487
—— преобразования понижающего термотрансформатора — Теоретическое значение 106
—— продольной силы 518
—— пропускания оптической системы 229
—— пульсации схемы однополупериодного выпрямителя 361
—— размолоспособности твердого топлива 178
—— расхода для диафрагм 494

—— расхода для истечения жидкости через отверстия 479, 480
—— расхода для сопел 495
—— сжатия струи при истечении жидкости через отверстия 479
—— скорости при истечении жидкости через отверстия 479
Коэффициент сопротивления дисковых затворов 491
—— для вентилей 490
—— для внезапного сжатия 487
—— для входа в трубу 486
—— для задвижек 490
—— для клапанов 492
—— для колен трубопроводов 488, 489
—— для отводов 489
—— конусных затворов 491
—— трения пластинки 517
—— трения стальных труб 472
—— тройников 487
Коэффициент температурный электролитов 355
—— теплоотдачи 140
—— теплоотдачи конвекцией 138, 143
—— теплоотдачи при конденсации пара — Значение 151
—— теплоотдачи рекуперативных теплообменников — Расчет 167
—— теплопередачи 126
—— теплопередачи рекуперативных теплообменников 166
Коэффициент теплопроводности 116
—— воды 123
—— газов 124
—— жидкостей 123
—— изоляционных материалов 119
—— материалов 117
—— металлов 120, 122
—— огнеупоров 118
—— паров 124, 125
—— сплавов 122
—— стали 121
—— строительных материалов 117
—— теплоизоляционных материалов 117
Коэффициент усиления триода статический 362
—— холодильный 98
—— шероховатости для каналов 477
—— шероховатости напорных трубопроводов 473
—— эффективности для квадратных ребер 129
—— эффективности для круглых ребер 128
Коэффициенты облученности при теплообмене излучением — Формулы расчетные 157
—— поправочные при расчетах теплоотдачи 146
—— потерь на отражение света 230
Крановые электродвигатели — см. *Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором для повторно-кратковременного режима работы серии МТК*
Крепление оптических деталей 238
Кривые намагничивания 334
Кристаллические решетки ионные — Энергия 294
—— чистых металлов 319
Кристаллографическая система элементов и их соединений 282
Критерий Био 130
—— Фурье 130
—— вязкостно-инерционный (Рейнольдса) 140
—— геометрического подобия 140
—— конвективного теплообмена (Пекле) 140
—— подобия 114
—— подъемной силы (Грасгофа) 140
—— теплоотдачи (Нуссельта) 140
—— физических свойств (Прандтля) 140
Критическая точка 38
Критическое состояние 37
Круг — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Кружилина формула 145, 149
Крутизна характеристики триода 362
Кулона закон 330
Кутателадзе формула 149

Л

Лабораторные термометры — см. *Термометры лабораторные*
Лаваля сопло 91, 521
Лагранжа метод изучения движения жидкости 503
Ламберта закон 156
Ламинарное течение 467
Лампы накаливания 225
—— электронные 360 — см. также *Диоды; Кенотроны; Пентоды; Тетроды; Триоды*
Левина профилографы 251, 252
Лекланше элемент 356
Ленца закон 333
Ленца-Джоуля закон 338
Леонарда система — см. *Система генератор-двигатель*
Лермантова объемомер 14
Линзы 233
— Крепление 239
Линия вихревая 504
Линника микроинтерферометры 251
—— микроскопы двойные 251
Лошадиные силы — Выражение в киловаттах 330

Лупы 253
Лучи апретурные 234
—— **полевые** 234
Лучистый поток 153

М

Магазин сопротивлений — Схема 375
Магнетизм 331
Магнитная восприимчивость чистых металлов 318
Магнитная проницаемость 332
Магнитная сталь сортовая — Свойства 336
Магнитное поле 331
— Действие на проводник с током 332
— Напряженность 332
— Энергия 334
Магнитные пускатели 436
Магнитные сплавы — см. *Сплавы для постоянных магнитов*
Магнитные цепи 337
Магнитный поток 332
Магнитоэлектрические осциллографы 375, 376
Магниты постоянные 336
Манометры 456; — Допустимая погрешность 12; — Классы точности 12
—— жидкостные 10, 456
—— Менделеева — Схема 11
—— поршневые 11
—— пружинные 12, 456
—— электрические 12
Марки углей 177
Масла — Вязкость 452
—— смазочные — см. *Смазочные масла*
Масса электрона 360
Материалы — см. также по видам материалов, например: *Изоляционные материалы; Проводниковые материалы; Смазочные материалы; Строительные материалы; Теплоизоляционные материалы; Электротехнические материалы*
— Излучение полное — Степень черноты 154
— Коэффициент теплопроводности 117
— Объемный вес 117
— Теплоемкость 117
Материалы катионитовые — Характеристика 200, 202
Маховой момент, приведенный к валу двигателя — Определение 423
Машины постоянного тока 381 — см. также *Генераторы постоянного тока; Двигатели постоянного тока; Коллекторные двигатели; Усилители электромашинные*
— Обмотки возбуждения — Схемы питания 383
— Основные соотношения 382
Машины постоянного тока ПН — Технические данные 385
—— с независимым возбуждением 383
—— с параллельным возбуждением 383
—— с последовательным возбуждением 383
—— со смешанным возбуждением 384
Машины холодильные — см. *Холодильные машины*
Междуатомное расстояние чистых металлов 319
Международная температурная шкала 2
Менделеева уравнение 45
—— формула 450
Металлографические микроскопы 251, 252
Металлургические электродвигатели — см. *Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором для повторно-кратковременного режима работы серии МТК*
Металлы — см. также *Сплавы; Сталь*
— Диффузия в металлах 313
— Коэффициент линейного расширения 15
— Коэффициент теплопроводности 120, 122
— Растворимость водорода 322
— Растворимость кислорода 323
— Температура плавления 37
— Теплоемкость 36, 37
Металлы чистые — Междуатомное расстояние 319
— Механические свойства 323, 324, 325, 327
— Растворимость азота 323
— Свойства физико-химические и механические 316—327
Метан — Пары насыщенные — Свойства 102
— Тепловые свойства 32
Метацентр 459
Механизмы исполнительные — Классификация по изменению момента статической нагрузки 422
Механический эквивалент тепла 40
Микроинтерферометры 251
Микроманометры 11, 456
Микрообъективы 239, 242
Микроскопы 242, 250; — Разрешающая сила 234
—— Бринеля 252
—— двойные по Линнику 251
—— металлографические 251, 252
Михеева формула 144, 147
Многоступенчатые компрессоры — см. *Компрессоры многоступенчатые*

Молекулы двухатомные — Энергия связей 280
Молекулярный вес газовой смеси 46
—— элементов и их соединений 282
Момент асинхронных двигателей трехфазных 394
—— инерции фигур — см. под названием фигур с подрубрикой — Момент инерции, например: *Кольцо* — Момент инерции; *Круг* — Момент инерции; *Полукруг* — Момент инерции; *Эллипс* — Момент инерции
—— маховой, приведенный к валу двигателя — Определение 423
—— статический — Приведение к валу двигателя 422
—— эквивалентный 430
Морская вода — Солевой состав 195
Морские смазки — см. *Смазки морские*
Мост Уитстона 374
Мощность — см. также *Коэффициент мощности*
— Единицы измерения 330
— Потери от вихревых токов — Расчет 333
Мощность на валу асинхронных двигателей трехфазных 394
—— номинальная электрических машин — Определение 380
—— тока — Измерение 373
—— цепи переменного тока 341
—— эквивалентная 430
—— электрического тока 338
—— электродвигателя — Расчет по условиям нагрева 426
Мятие — см. *Дросселирование*

Н

Нагрев электродвигателя 427
Нагревание параллелепипеда — Расчет 136
—— пластин — Расчет 129, 131
—— цилиндров — Расчет 133, 134, 136
—— шаров — Расчет 136
Нагнетатели центробежные 59
Нагрузки, допустимые для проводов и кабелей с резиновой изоляцией 351
—— для троллеев 351, 352
—— для шин 351, 352
Напор 463; — Потери 467
—— в трубопроводах — Расчет 498
—— динамический 520
—— потерянный для диафрагм, сопел и труб Вентури 496
—— скоростной 520
—— температурный 138, 139
Напряжение — Составляющие 515
—— аккумуляторов — Изменение 357
—— выпрямленное полупроводниковых выпрямителей — Кривые 369
—— допустимое полупроводниковых выпрямителей 369
—— линейное — Соотношение с фазным 342
—— низковольтных сетей промышленных предприятий 350
—— номинальное приемников электрической энергии 380
—— номинальное электрических машин 380
—— поверхностное 453, 454
—— поверхностное чистых металлов 318
—— силовых и термических токоприемников 350
—— тока — Измерение 373
Напряженность магнитного поля 332
—— электрического поля 330
Насадки 480
Насосы тепловые 105
Нейтроны 272
Неорганические соединения — Температуры плавления и испарения 295
— Теплоты плавления и испарения 295
Нефтепроводы — Гидравлический расчет 475
Нефтепродукты — Вязкость 452
— Удельный вес 450
Низкоплавкие смазки — см. *Смазки консистентные низкоплавкие*
Никурадзе формула 471
Номинальные значения параметров электрических машин 379
Номинальный ток силовых и термических токоприемников 350
Номограммы для гидравлического расчета стальных трубопроводов 474
—— для гидравлического расчета старых водопроводных труб 474
—— для составления смазок 221
Нуссельта критерий теплоотдачи 140
Ньютона-Рихмана закон 125

О

Обескислороживание воды 202
Обессоливание воды 202
Обмотки компенсационные 382
—— трехфазные — Соединение 342
—— якоря 382; — Выводы — Обозначения 382
Обмоточные провода — см. *Провода обмоточные*
Обозначения аппаратов для элементных схем 437
—— магнитных величин 328
—— углей 177

—— условные термодинамические 40
—— электрических величин 328
Образцовые термометры — Шкалы 4, 5
Обтекание клина 527
—— конуса 528
—— пластинки 511
—— стенок газом 526
—— цилиндра 509
—— шара 512
Объективы 242 — см. также по их названиям, например: *Апохроматы, Ахроматы, Зеркально-линзовые объективы, Кварцевые объективы*
—— для микроскопов 242
—— для микрофотографии 242
—— для телескопических систем 240
—— для ультрафиолетовых лучей 244
Объем удельный — см. *Удельный объем*
Объемный вес изоляционных материалов 119
—— огнеупоров 118
Объемомер Лермантова 14
Объемомеры — Применение для определения удельного объема 13
Огнеупоры — Коэффициент теплопроводности 118
— Объемный вес 118
— Теплоемкость 118
Однофазные двигатели — см. *Асинхронные двигатели однофазные; Конденсаторные двигатели однофазные*
Одноцилиндровые компрессоры — см. *Компрессоры одноцилиндровые*
Окисляемость воды 193
Октава 256
Окуляр-микрометры 245, 250
Окуляры 241, 242, 245
—— микроскопов 244 — см. также по их названиям, например: *Ахроматические окуляры; Компенсационные окуляры; Ортоскопические окуляры; Симметричные окуляры*
Ома закон для магнитной цепи 337
—— для цепей переменного тока 340
—— для цепей постоянного тока 337
—— для электролитов 354
Омметры — Схема 375
Опак-иллюминаторы 252
Опорожнение водохранилищ 483
—— резервуаров 483
Оптика 224—253; — Просветление 229
—— геометрическая 228
—— физическая 226
Оптиметры 250
Оптическая сила 232
Оптические делительные головки 250
Оптические детали — Крепление 238
Оптические измерительные приборы 249
Оптические квадранты 252
Оптические приборы 245, 246
Оптические системы — Главные лучи 233
— Главные плоскости 231
— Основные типы 240
— Построение изображения 231
— Разрешающая сила 234
— Расчет габаритный 234
— Световые пучки — Ограничение 233
— Увеличение 232
— Фокусы 231
Оптические угломеры 252
Органические соединения — Свойства 296
— Температуры плавления и испарения 302
— Теплоты сгорания, плавления и испарения 302
Ортоскопические окуляры 244
Осветители суспензионные 197
Осветление воды 196
ОСТ 18180-40 197
ОСТ ВКС 6954 2
Остойчивость 459
Осциллографы 375
Осциллоскопы 376
Отводы — Коэффициент сопротивления 489
—— трубопроводов 494, 495
Отдача аккумуляторов 358
Отображение конформное 510
Отражательные призмы 234, 235
Отражение звука 259
Охлаждение параллелепипеда — Расчет 136
—— пластин — Расчет 129, 131
—— шара — Расчет 136
Очистка воды — Реагенты — Удельный вес 203
—— от масла 203

П

Павловского формула 473
Пар — Дросселирование 92
— Истечение 91
— Конденсация — Теплоотдача 150
— Коэффициент динамический 142
— Определение 61
— Степень черноты 162
— Тепловые свойства 31
Пар во влажном воздухе — Удельные веса 107; — Энтальпия 108, 111
Пар насыщенный — Определение 61; — Формулы 61
—— влажный — Параметры 61
—— сухой — Параметры 61; — Таблицы величин 62
Пар перегретый — Определение 61
— Таблицы величин 62

— Тепловые свойства 72
— Теплоемкость 68, 70, 88
— Удельный объем 72
— Формулы 62
Пар ртутный сухой насыщенный — Параметры 95
Параллелепипеды — Нагревание — Расчет 136
— Охлаждение — Расчет 136
Параллельное соединение источников энергии 339
—— конденсаторов 331
—— приемников энергии 339
Паропроводы — Гидравлический расчет 475
Паросиловые установки — Схема 93
— Цикл работы 93
Пароэжекторные холодильные машины — см. *Холодильные машины пароэжекторные*
Парциальное давление газовой смеси 46
Пары — Коэффициент теплопроводности 124, 125
—— аммиака насыщенные — Свойства 98
—— сернистого ангидрида насыщенные — Свойства 99
—— углеводородов насыщенные — Свойства 102
—— углекислоты насыщенные — Свойства 103
—— фреонов насыщенные — Свойства 99, 100, 101
Паскаля закон 455
Пекле критерий конвективного теплообмена 140
Пентоды — Включение — Схема 364
— Параметры 364
Переключатели рубящие 433
Переменный ток 339
— Выпрямление в постоянный 361
— Закон Ома 340
— Контакторы 434
— Мощность цепи 341
— Резонанс 341
— Схемы выпрямления 369
— Цепи — см. *Электрические цепи переменного тока*
Период 339
Периодическая система элементов 269, 270
Периодический закон 269
Петрова формула 470
π-теорема 115
Пикнометры — Применение для определения удельного объема 13, 15
Питательная вода — см. *Вода питательная*
Плавание тел 459
Плавкие предохранители 433
Планка постоянная 153
Пластинки — Обтекание 511
Пластины — Безразмерная температура 132
— Нагревание — Расчет 129, 131
— Охлаждение — Расчет 129, 131
— Распределение температур — Уравнение 129
Платина — Электрическое сопротивление 5, 6
Пленочные фотокамеры 247
Плотность 449
—— органических соединений 297
—— полусферического излучения 153
—— теплового потока 116, 138
—— элементов и их соединений 282
Поверхности теплообменников — Выбор 168
Поверхностное натяжение — см. *Натяжение поверхностное*
Поглощение звука 259
Пограничный слой 517
Подобия закон 516
Подъемная сила профиля крыла 527
Покой жидкости относительный 460, 461, 462
Поле — см. также *Магнитное поле; Электрическое поле*
—— асинхронных двигателей трехфазных вращающееся 394
—— температурное 115
Полевые лучи 234
Политропа — Построение 50
Политропический процесс 48, 50
Полуапохроматы 243
Полукруг — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Полупроводниковые выпрямители — см. *Выпрямители полупроводниковые*
Поляра ударная 524
Поляризация света 227
—— элемента 356
Понижение шума 266
Порог слышимости 256
Пороги водосливов 484
Порошкообразные смазки — см. *Смазки порошкообразные*
Поршневые двигатели — см. *Двигатели поршневые*
Поршневые манометры 11
Последовательное соединение источников энергии 338
—— конденсаторов 331
—— приемников энергии 338
—— сопротивлений 340
Постоянная Больцмана 153
—— Планка 153
—— решеток чистых металлов 319
Постоянный ток 338

— Контакторы 434
Потенциальное движение 507
—— жидкости 506
Потенциалы ионизации 273, 278
—— нормальные чистых металлов 318
—— скоростей комплексные 507
—— термодинамические 43
—— электрического поля 330
Потери в тройниках 487
—— кинетической энергии на удар — Теорема 506
—— на гистерезис 335
—— напора 467
—— напора в трубопроводах местные 485
—— напора в трубопроводах при турбулентном потоке — Влияние шероховатости 171, 465
—— работы вследствие необратимости 42
Поток — Коэффициент кинетической энергии 463; — Сила действия на граничные стенки 500
—— вектора напряженности поля 330
—— вектора скорости 504
—— газовый — Смешение 46; — Уравнение первого закона термодинамики 90
—— газовый звуковой — Определение числа М 526
—— газовый сверхзвуковой — Определение числа М 526
—— жидкости — Уравнение неразрывности 463, 464, 465
—— ламинарный 467, 468, 469
—— лучистый 153
—— магнитный 332
—— реальной жидкости 463, 464, 465
—— тепловой — Плотность 116, 138
—— турбулентный 467
—— циркуляционный — Обтекание цилиндра 509, 510
Потокосцепление 333
Правило левой руки 332
—— правой руки 333
Прандтля критерий физических свойств 140
Предохранители плавкие 433
Предохранительные смазки — см. *Смазки предохранительные*
Преобразователи частоты — Определение 378
Приборы для измерения давления 10, 455 — см. также *Вакуумметры жидкостные; Дифманометры жидкостные; Жидкостные приборы для измерения давления; Манометры; Микроманометры*
—— ионные — см. *Ионные приборы*
—— электронные — см. *Электронные приборы*
Приемники электрической энергии — Напряжения номинальные 380
Призмы — Крепление 238; — Прохождение луча 230
—— отражательные 234, 235
Природная вода — см. *Вода природная*
Природный газ 192
Присадки к смазочным материалам 223
Провода многожильные — Конструктивные данные 347
—— обмоточные 348
—— обмоточные круглые — Диаметры стандартные 348, — Размеры 349; — Толщина изоляции 349
—— обмоточные прямоугольные — Толщина изоляции 350
—— с винилитовой изоляцией — Характеристика 344
—— с резиновой изоляцией — Допустимые нагрузки 351; — Конструктивные данные 346; — Характеристика 344
Проводимость 340 — см. также *Сопротивление*
—— электролитов удельная 355
Проводки 350
—— в стальных трубах 352
Проводниковые материалы — Свойства 343
— Температура плавления 9
— Термо-электродвижущая сила 9
Продукты горения — Диссоциация 175
— Теплосодержание 173
Проекторы 250
Прозрачность воды 193
Прокладки амортизационные акустические 267
Проницаемость магнитная 332
—— триода 362
Пропан — Пары насыщенные — Свойства 102
— Свойства 33, 97
Пропен — см. *Пропилен*
Пропилен — Свойства 35, 97
Просветление оптики 229
Пространственный заряд 360
Протоны 271
Профилографы 251
Профиль крыла — Волновое сопротивление 527; — Подъемная сила 526
—— симметричный Жуковского 511
Процессы необратимые 41
—— обратимые 41
Прочность электрическая 330
Пружинные манометры 12, 456
Пружины амортизационные 266
Психрометры 112

Прямоугольник — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Пуаз 451
Пуазейля закон 467
Пуск асинхронных двигателей 417
—— двигателя в системе генератор — двигатель 426
—— двигателей постоянного тока 385
—— синхронных двигателей 407, 408
Пускатели магнитные 436
Пусковые сопротивления 433
—— асинхронных двигателей — Расчет 415, 418
—— двигателей постоянного тока — Расчет 411, 414
Пыль угольная — Вес насыпной 179
— Вес удельный кажущийся 179
— Теплоемкость 189
Пьезометрический уклон 464
Пьезометры 455
Пусковые схемы синхронных двигателей 407

Р

Работа — Выражение графическое и аналитическое 41; — Потери вследствие необратимости 42; — Эквивалент тепловой 40
—— электрического тока 338
Равновесие тела в жидкости 459
Радиально-кольцевые щели 492
Радиальные щели 492
Радиус атомный чистых металлов 319
Разветвленные цепи переменного тока 341
Размолоспособность твердого топлива 178
Разность потенциалов 331
Разрешающая сила оптических систем 234
Разряд конденсатора 331
Разрядные сопротивления 433
Рамзина $i-d$-диаграмма 111
Расходомеры потоков в трубопроводах 494
Расходомеры-счетчики скоростные 496
Расхождение вектора скорости 504
Расширение газов адиабатическое 49
—— газов политропическое 49
—— тепловое 15
—— трубопровода внезапное 486
Реагенты для очистки воды — Удельный вес 203
Реактивная составляющая тока 340
Реактивные глушители 268
Реактивные двигатели — см. *Двигатели реактивные*
Реакция якоря 382
Реальные газы — см. *Газы реальные*
Ребра квадратные — Коэффициент эффективности 129
—— круглые — Коэффициент эффективности 128
Реверберация 262, 263
Реверс двигателя в системе генератор — двигатель 426
—— постоянного тока 385
Регенеративные циклы паросиловых установок 94
Регенерация анионитовых фильтров 202
—— Н-катионита 201
—— фильтров 201
Регулировочные сопротивления 433
Резервуары — Вход в трубу 486
— Изменение уровней жидкости 483
— Коэффициент сопротивления для входа в трубу 486
— Опорожнение 483
Резонанс напряжений 340
—— переменного тока 341
Резонансное звукопоглощение 261
Резонансные звукопоглотители 261
Рейнольдса критерий вязкостно-инерционный 140
—— число 467, 485, 517
Рекуперативные теплообменники — см. *Теплообменники рекуперативные*
Реле — Обозначения в элементных схемах 437
—— времени 435
—— контроля скорости 435
—— контроля технологических параметров 435
—— максимальной защиты 435
—— напряжения 435
—— промежуточные переменного тока 434
—— промежуточные постоянного тока 434
—— счета импульсов 435
—— тока 434
Релейно-контакторные схемы — Начертание 436
— Характеристика 439
Реостаты 433
Решетки ионные кристаллические — Энергия 294
Рототролы 388
Ртутно-водяные циклы паросиловых установок 95
Ртутные выпрямители — см. *Выпрямители ртутные*
Ртутные термометры — см. *Термометры ртутные*
Ртуть — Удельный вес 449, 450
Рубильники 433
Рукава гибкие тканевые — Гидравлический расчет 476

—— резиновые — Гидравлический расчет 476
Руль Жуковского 511

С

Самовозбуждение генератора постоянного тока 384
Самоиндукция 333
Свет — Дисперсия 230
— Диффракция 228
— Закон отражения 228
— Закон преломления 228
— Интерференция 226
— Источники — Яркость 225
— Показатели преломления 229
— Поляризация 227
— Распространение в средах 228
Световые величины 224
Световые единицы измерения 224
Светящиеся составы 225
Свинец — Электрическое сопротивление 5, 7
Свинцовые аккумуляторы — см. *Аккумуляторы свинцовые*
Сериесные машины — см. *Машины постоянного тока с последовательным возбуждением*
Серная кислота — Растворы — Характеристика 357
Сернистый ангидрид — см. *Ангидрид сернистый*
Сероводород — Тепловые свойства 29
Сероуглерод — Тепловые свойства 30
Сети электрические — см. *Электрические сети*
Сжатие внезапное — Коэффициент сопротивления 487
—— воздуха в многоступенчатых компрессорах 58
—— воздуха в одноцилиндровых компрессорах 57
—— воздуха в центробежных нагнетателях 59
—— струи 479
—— трубопроводов внезапное 487
Сигнализация — Аппаратура 436
Силиконовые смазки — см. *Смазки силиконовые*
Силиконы — Применение в качестве смазок 221
Силовые кабели — см. *Кабели силовые*
Симметричные окуляры 240, 244
Симметричный профиль Жуковского 511
Синусоидальный переменный ток 339
Синхронные двигатели — Векторная диаграмма 405
— Область применения 408
— Принцип действия 404
— Пуск при полном напряжении 407
— Пуск через автотрансформатор 408
— Пуск через реактор 408
— Пусковые схемы 407
— Пусковые характеристики 406
— Рабочий режим 406
— Сравнение с асинхронными 408
— Устройство 404
— Эксплуатационные свойства 408
Синхронные двигатели серии МС-320 — Технические данные 407
—— трехфазные — Статорные обмотки — Выводы — Обозначения 396
Система Леонарда — см. *Система генератор — двигатель*
Системы генератор — двигатель—Переходные режимы 425
— Принципиальные схемы 444
— Пуск двигателя 426
— Реверс двигателя 426
— Статические механические характеристики 420
— Торможение 426
Системы единиц измерений 328
Скачки уплотнения 522, 523
Скольжение асинхронных двигателей трехфазных 394
Скорость асинхронных двигателей — Регулирование 419
—— газового потока — Измерение 526
—— индуцируемая вихревой нитью 514
—— истечения газа 90
—— истечения жидкости 90
—— комплексная 507
—— синхронная вращения асинхронных двигателей трехфазных 394
Сланцы — Характеристика теплотехническая 188
—— горючие — Характеристики физико-химические 184, 188
Смазка водой 221
Смазки воздушные 221
—— для автотранспорта — Физико-химические свойства 219
—— индустриальные — Физико-химические свойства 218, 219
—— коллоидные 221
Смазки консистентные — Замена 222; — Применение 214
—— низкоплавкие 214; — Физико-химические свойства 215
—— силиконовые 221
—— среднеплавкие 214; — Физико-химические свойства 216
—— тугоплавкие 215; — Физико-химические свойства 217

Смазки морские — Физико-химические свойства 219
—— порошкообразные 221
—— предохранительные — Физико-химические свойства 220
—— твердые 221
—— эмульсионные 221
Смазочные масла — Присадки 223
—— жидкие — Применение 204
—— жидкие для двигателей внутреннего сгорания — Физико-химические свойства 208
—— жидкие для паровых машин — Физико-химические свойства 214
—— жидкие общего назначения — Физико-химические свойства 204, 206
—— целевого назначения — Физико-химические свойства 205, 210
Смазочные материалы 204—223 — см. также *Смазки; Смазочные масла*
— Замена 221
Смеси газовые 45
Сода кальцинированная — Состав 200
—— каустическая — Состав 200
Соединение обмоток трехфазных источников энергии 342
—— приемников энергии в трехфазных цепях 343
Соединения неорганические — см. *Неорганические соединения*
—— органические — см. *Органические соединения*
—— химические — см. *Химические соединения*
Соленоид 332
Сопло 495; — Коэффициент расхода 495; — Определение 90
—— Лаваля 91, 521
—— расширяющееся — Применение 91, 521
Сопротивление 433 — см. также *Проводимость*
— Последовательные соединения 340
Сопротивление в трубопроводах местные 485
—— внутреннее триода 362
—— волновое профиля крыла 527
—— клапанов 491
—— платины электрическое 5, 6
—— проводника 337
—— пусковое электродвигателей 411, 433
—— разрядное 433
—— свинца электрическое 5, 7
—— термическое 126, 166
—— тормозное 433
—— тока — Измерение 374
Составляющие напряжений 515
Спектральная интенсивность 153
Спектры звуковые 258
—— шума 264, 265
Спирт этиловый — см. *Этиловый спирт*
Сплавы — Коэффициент линейного расширения 15
— Коэффициент теплопроводности 122
— Температура плавления 37
— Теплоемкость 36, 37
Сплавы для постоянных магнитов — Свойства 336
Среднеплавкие смазки — см. *Смазки консистентные среднеплавкие*
Сталь — Коэффициент теплопроводности 121
—— магнитная сортовая — Свойства 336
—— трансформаторная холоднокатанная — Свойства магнитные 335
—— электротехническая листовая — Характеристика 335
Станции управления электродвигателями 436
Статоры 381
Стенки — Степень черноты 163
—— неподвижные — Сила действия потока — Определение 500
—— плоские — Теплопередача 125
—— подвижные — Сила действия потока — Определение 501
—— ребристые — Теплопередача 128
—— шаровые — Теплопередача 127
—— цилиндрические — Коэффициент кривизны 127; — Теплопередача 126
Степень диссоциации 354
Степень черноты 153
—— газа 163
—— пара 162
—— полного излучения материалов 154
—— стенки 163
—— углекислоты 161
Стефана-Больцмана закон 153
Сток 508, 512
Стокс 451
Строение атомов 271
—— электронных оболочек невозбужденных атомов 272
Строительные материалы — Коэффициент теплопроводности 117
— Объемный вес 117
— Теплоемкость 117
Строфоида 524
Струя — Сжатие 479
Сублимация 38
Сульфоуголь — Характеристика 200
Суспензионные осветлители 197
Сухие элементы 356
Сфера — Преломление луча 231
Сферометры 251

Схемы двигателей постоянного тока 442
—— принципиальные системы генератор — двигатель 444
—— релейно-контакторного управления 436; — Характеристика 439
Счетчики-расходомеры аксиальные скоростные 497
—— скоростные 502

Т

Твердое топливо — см. *Топливо твердое*
Твердые смазки — см. *Смазки твердые*
Тела — Тепловые свойства 1—39
—— абсолютно черные 153
—— в жидкости — Условия равновесия 459
—— диффузно излучающие 156
—— капельно-жидкие — Теплоемкость средняя удельная 18
—— серые 153
Тела твердые — Коэффициент линейного расширения 15
— Температура плавления 38
— Теплоемкость средняя удельная 18
— Теплообмен излучением 156
— Удельный объем — Определение 13
Тела ферромагнитные — Свойства 334
Телескопические оптические системы 240
Телескопы — Разрешающая сила 234
Температура 1
—— абсолютная 2
—— безразмерная пластин 132
—— безразмерная цилиндров 135
—— воспламенения 170
—— вспышки горючих веществ 312
—— газовых смесей 45
—— горения 173
—— инверсии 92
—— испарения неорганических соединений 295
—— испарения органических соединений 302
—— испарения элементов 295
—— кипения газов 39
—— кипения органических соединений 297
—— кипения элементов и их соединений 282
Температура плавления 37
—— газов 39
—— жидкостей 38
—— и испарения органических соединений 302
—— металлов 37
—— неорганических соединений 295
—— органических соединений 297
—— проводниковых материалов 9
—— сплавов 37
—— твердых тел 38
—— элементов и их соединений 282, 295
Температура пламени максимальная при горении газов 312
—— росы 112
—— самовоспламенения горючих веществ 312
—— сжатого воздуха 57
Температурное поле 115
Температурные шкалы — см. *Шкалы температурные*
Температурный коэффициент объемного расширения жидкости (газа) 140
Температурный напор 138, 139
«Тень звуковая» 255
Теорема Гаусса 330
—— Кирпичева и Гухмана 115
—— Томсона 513
—— Эйлера 506
—— количества движения для жидкости 506
—— о вихрях 513
—— о потере кинетической энергии на удар 506
Теория горения — Расчет 170—175
—— пограничного слоя 517
Тепло — Поток через поверхность 138
Тепловое расширение 15
Тепловой поток — Плотность 116, 138
Тепловой эквивалент работы 40
Тепловые насосы 105
Тепловые свойства азота 20, 21
—— воды 72
—— тел 1—39
Теплоемкость 17; — Зависимость от температуры 18
—— азота 20, 21
—— ацетилена 34
—— бензола 35
—— бутадиена 34
—— водорода 23
—— воды 18
—— воздуха 22
—— водяного пара 31
—— газов 17, 18, 19—35
—— газовой смеси 46
—— гидроксильной группы OH 26
—— закиси азота 28
—— капельно-жидких тел средняя удельная 18
—— кислорода 19
—— материалов 117
—— металлов 36, 37
—— метана 32
—— огнеупоров 118
—— окиси азота 25
—— окиси углерода 24

—— перегретого пара 68, 70, 88, 89; — График 62
—— пропана 33
—— пропилена 35
—— сернистого ангидрида 29
—— сероводорода 29
—— сероокиси углерода 30
—— сероуглерода 30
—— сплавов 36, 37
—— строительных материалов 117
—— твердого топлива 189
—— твердых тел средняя удельная 18
—— теплоизоляционных материалов 117
—— углекислого газа 27
—— угольной пыли 189
—— этана 32
—— этилена 33
—— этилового спирта 36
Теплоизоляционные материалы — Коэффициент теплопроводности 117
— Объемный вес 117
— Теплоемкость 117
Теплообмен — Поверхности — Выбор 168
Теплообмен излучением 114, 152; — Взаимные поверхности — Формулы расчетные 157; — Коэффициенты облученности — Формулы расчетные 157
—— в газоходах котлоагрегатов — Расчет 163
—— между газом и поверхностью твердого тела 160
—— между твердыми телами 156
Теплообмен конвективный 114, 138
— Уравнения 139
Теплообменники 163
— Гидравлический расчет 167
— Оптимальная форма — Выбор 168
— Расчет гидравлический 167
Теплообменники рекуперативные — Коэффициент перевода 165
— Коэффициент теплоотдачи — Расчет 167
— Коэффициент теплопередачи 166
— Расчет тепловой 164
— Термическое сопротивление — Расчет 166
— Уравнения теплового баланса 164
— Уравнения теплопередачи 164
Теплоотдача — Коэффициенты поправочные 146
—— горизонтальных плит — Расчет 148
—— конвективная 114
—— при вынужденном движении жидкости 143
—— при кипении жидкости 148
—— при конденсации пара 150
—— при поперечном обтекании пучков из ребристых труб 147
—— при поперечном обтекании труб и пучков труб 146
—— при продольном обтекании пластины 145
—— при свободном движении жидкости 147
—— при течении в трубах и каналах 143
—— при турбулентном течении жидкости (газа) 144
Теплопередача 114—169
—— через плоские стенки 125
—— через ребристые стенки 128
—— через цилиндрические стенки 126
—— через шаровые стенки 127
Теплопроводность 114, 115
—— воды 123
—— газов 124
—— жидкостей 123
—— изоляционных материалов 119
—— металлов 120, 122
—— огнеупоров 118
—— паров 124, 125
—— при внутренних источниках тепла 129
—— при нестационарном режиме 129
—— при стационарном режиме 125
—— сплавов 122
—— стали 121
Теплосодержание идеальных газов 519
—— продуктов горения 173
Теплота 1—169
—— газов 18
—— жидкости 61
—— плавления 37
Теплоты испарения 37
—— испарения газов 39
—— образования химических соединений 304
—— парообразования ртутного пара 96
—— плавления газов 39
—— плавления и испарения неорганических соединений 295
—— плавления и испарения органических соединений 302
—— плавления и испарения элементов 295
—— сгорания органических соединений 302
—— сгорания жидкого топлива 189
—— сгорания углей — Расчет 178
Теплофикационные установки 94
Теплофикационные циклы паросиловых установок 94
Термические термометры — Шкалы 5
Термический к. п. д. цикла двигателей 50, 51, 52, 56

—— регенеративного 94, 95
—— турбин 54, 55
Термическое сопротивление — см. *Сопротивление термическое*
Термодинамика — Дифференциальные уравнения 43
—— получения холода 97
—— техническая 40—113
Термодинамическая температурная шкала 2
Термодинамические функции — см. *Функции термодинамические*
Термодинамический потенциал 43
Термокатионные установки 198
Термометры — Допустимые погрешности 5
—— лабораторные — Шкалы 4
—— образцовые — Шкалы 4, 5
—— ртутные — Показания — Поправки 2, 4
—— сопротивления 5
—— термические — Шкалы 5
Термопары 8
Термотрансформаторы 106
Термоумягчители 198
Термо-электродвижущая сила проводниковых материалов 9
—— чистых металлов 318
Термоэлектронная эмиссия 360
Термоэлементы 8
Тетроды — Включение — Схема 363
— Параметры 363
Техническая термодинамика — см. *Термодинамика техническая*
Течение ламинарное 467
Тиратроны 366
— Параметры 366
— Управление сеточное 367
— Характеристика сеточная 366
Ток номинальный предельно допустимый для плавких вставок проводов и кабелей с резиновой изоляцией 351
—— номинальный силовых и термических токоприемников 350
—— пусковой асинхронных двигателей трехфазных 394
—— эквивалентный 428
Токи вихревые 333
—— линейные — Соотношения с фазными 342
—— насыщения 361
—— полупроводниковых выпрямителей 369
Токоприемники силовые и термические — Напряжение 350
—— термические — Номинальный ток 350
Томсона теорема 513
Топливо 176—192
— Вес насыпной 179
— Вес удельный кажущийся 179
— Газификация 174
— Содержание влаги — Расчет 178
Топливо газообразное 189, 192 — см. также *Газ водушной продувки; Газ генераторный; Газ доменный; Газ коксовых печей; Газ природный*
— Состав 190
— Теплота сгорания 190
Топливо жидкое — Состав 189
— Теплота сгорания 189
Топливо твердое — см. также *Дрова; Кокс; Пыль угольная; Сланцы; Торф; Угли*
— Коэффициент размолоспособности 178
— Размолоспособность 178
— Теплоемкость 189
— Характеристики теплотехнические 186
— Характеристики физико-химические 180, 186
Торможение асинхронных двигателей 415
—— в системе генератор — двигатель 426
—— динамическое краново-металлургических двигателей 416
—— электрическое 410
Тормозные сопротивления 433
Торф — Характеристика теплотехническая 188
— Характеристика физико-химическая 184, 188
Точка критическая 38
—— росы 112
Точки постоянные международной температурной шкалы 3, 4
Трансформаторная сталь холоднокатанная — Свойства магнитные 335
Трансформаторы 392; — Напряжения номинальные 380
—— измерительные 372
—— напряжения — Применение для измерений 372
—— тока — Применение для измерений 372
Трапеция — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Треугольник — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Трехфазные асинхронные двигатели — см. *Асинхронные двигатели трехфазные*
Трехфазные системы с нулевым проводом 343
Трехфазные цепи — см. *Электрические цепи трехфазные*
Трехэлектродные лампы — см. *Триоды*

Триоды 361
— Параметры 362, 363
— Характеристика сеточная 362, 366
Тройники 487
— Коэффициент сопротивления 487
— Потери 487
Троллеи — Допустимые нагрузки 351, 352
Труба Вентури 496
Трубка вихревая 504
Трубки электронно-лучевые 376
Трубопроводы — см. также *Газопроводы; Нефтепроводы; Паропроводы*
— Колена 488
— Напор — Расчет 498
— Отводы 488, 489
— Потери напора местные 485
— Расчет гидравлический 498
— Расширение внезапное 486
— Сжатие внезапное 487
— Сопротивления местные 485
Трубопроводы без ответвлений — Гидравлический расчет 498
—— бетонные — Гидравлический расчет 476
—— железобетонные — Гидравлический расчет 476
—— напорные — Коэффициент шероховатости 473
—— с параллельными ветвями — Гидравлический расчет 499
—— с тупиковыми разветвлениями — Гидравлический расчет 500
—— стальные — Гидравлический расчет — Номограммы 474; — Значения коэффициента сопротивления трения 472
—— стальные напорные ГЭС — Расчет 473
Трубы — Выбор диаметра для проводки проводов 354; — Гидравлический удар 492
—— асбестоцементные — Гидравлический уклон 475
—— водопроводные старые — Гидравлический расчет — Номограммы 474
—— водопроводные чугунные — Гидравлический расчет 475; — Коэффициент сопротивления трения 475
—— газо-водопроводные — Выбор диаметра для прокладки проводов и кабеля 352
—— деревянные из клепок — Гидравлический расчет 476
—— некруглого сечения — Гидравлический расчет 476
—— стальные — Значения эквивалентной абсолютной шероховатости 471; — Коэффициент сопротивления трения — График 472
Тугоплавкие смазки — см. *Смазки консистентные тугоплавкие*
Турбины внутреннего сгорания — Циклы 53
Турбулентный режим равномерного напорного движения жидкости 470
Тушение горючих веществ — Средства 312

У

Увеличение оптической системы 232
Углеводороды 101 — см. также *Метан; Пропан*
Углекислота — Пары насыщенные — Свойства 103
— Степень черноты 161
Углекислый газ — Тепловые свойства 27
Углерод-окись — Тепловые свойства 24
Углерод-сероокись — Тепловые свойства 30
Угли — Вес насыпной 179
— Вес удельный кажущийся 179
— Классификация по размеру кусков 177
— Марки — Обозначения 177
— Масса — Пересчет 177
— Масса горючая — Пересчет на рабочую 178
— Масса рабочая — Пересчет на горючую 178
— Теплота сгорания — Расчет 178
— Характеристики теплотехнические 186
— Характеристики физико-химические 180, 186
Угли бурые — Классификация по размеру кусков 177
—— донецкие — Маркировка 176
Угломеры оптические 252
Углы апретурные 233
Угол возмущения 524
—— критический 525
—— сдвига фаз 339
Уголь — см. *Угли*
Угольная пыль — см. *Пыль угольная*
Удар гидравлический в трубах 492
Ударная волна 522
Ударная поляра 524
Удельный вес 13, 449
—— газовой смеси 46
Удельный объем 13
—— ртутного пара 96
Уитстона мост 374
Уклон гидравлический 464
—— пьезометрический 464
Универсальные электродвигатели 409

Умягчение воды ионным обменом 200
—— химическое 197
Уравнение Бернулли 463, 464, 465, 498, 505, 519, 520
—— Бернулли для простого трубопровода — График 498
—— Бойля-Мариотта 44
—— Ван-дер-Ваальса 38, 60
—— Вукаловича 62
—— Гей-Люссака 44
—— Громека 505
—— Клапейрона 45
—— Клапейрона-Клаузиуса 62
—— Менделеева 45
—— Эйлера 505
Уравнения адиабаты при переменной теплоемкости 48
—— движения вязкой жидкости 514
—— движения газа 519
—— движения электропривода 421
—— дифференциальные термодинамики 43
—— для потока реальной жидкости 463
—— для распределения температуры в пластинах 129
—— кинетической теории газов 44
—— конвективного теплообмена 139
—— напряжений для цепи якоря двигателя 383
—— неразрывности 504, 507
—— первого закона термодинамики для газового потока 90
—— состояния приведенные 60
—— состояния реального газа 60
—— сплошности 90
—— теплового баланса для рекуперативных теплообменников 164
—— теплопередачи для рекуперативных теплообменников 164
Усилители двухкаскадные на постоянном токе 362
—— с критическим возбуждением 388
—— с поперечным возбуждением 388
—— электромагнитные 378, 388, 392; — Применение 446
Условные обозначения термодинамические 40
Установки бинарные — см. *Бинарные установки*
—— водоочистительные — см. *Водоочистительные установки*
—— для содо-известкового водоумягчения 199
—— паросиловые — см. *Паросиловые установки*
—— теплофикационные — см. *Теплофикационные установки*
—— термокатионные 198
Устройства запорные 490

Ф

Фарадея закон 356
Ферромагнитные тела — Свойства 334
Фигуры плоские — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Физическая оптика 226
Филоненко формула 471
Фильтрация воды 195
Фильтрование параллельное 201
Фильтры — Регенерация 201
—— акустические 268
—— анионитовые — Регенерация 202
—— двухпоточные 196
—— зернистые напорные 196
Фитинги 489
Фокусные расстояния — Расчет 232
Фокусы оптической системы 231
Фон 257
Формула Базена 485
—— Блазиуса 471
—— Голубинского 150
—— Гухмана и Илюхина 145
—— Жуковского 499
—— Конакова 471
—— Кружилина 145, 149
—— Кутателадзе 149
—— Менделеева 450
—— Михеева 144, 147
—— Никурадзе 471
—— Павловского 473
—— Петрова 470
—— Филоненко 471
—— Шези 470
—— Шифринсона 471
—— Чаплыгина 510
Фотокамеры 247, 248
—— пленочные 247
Фотообъективы 245
— Разрешающая сила 234
Фотореле — Схема 365
Фотоувеличители 249
Фотоэлектронная эмиссия 360
Фотоэлементы — Параметры 365
— Характеристики 364, 365
— Чувствительность 364
Фотоэлементы с внешним фотоэффектом 364
Фреоны — Свойства 97, 99, 100, 101
Фруда число 517
Функции термодинамические 42
Функция Жуковского 511
Фурье критерий 130

Х

Характеристические функции — см. *Функции термодинамические*

Химические соединения — Образование — Свободные энергии 304
— Теплоты образования 304
Химия 269—315
Хлорметил — Свойства 97
Холод искусственный — Производство — Термодинамика 97
Холодильные агенты — Показатель адиабаты 97
— Физические свойства 97
— Характеристика термодинамическая 98
Холодильные машины — Цикл работы 103
—— абсорбционные — Схема 105
—— компрессионные — Схема 103; — Цикл работы 104
—— пароэжекторные — Схема 104; — Цикл работы 105

Ц

Центр водоизмещения 459
—— тяжести фигур — см. под названиями фигур с подрубрикой — Центр тяжести; например: *Трапеция* — Центр тяжести; *Треугольник* — Центр тяжести; *Фигуры плоские* — Центр тяжести
Центробежные нагнетатели 59
Цепи магнитные — см. *Магнитные цепи*
—— электрические — см. *Электрические цепи*
Цикл Карно 51
Циклы газовых двигателей 50
—— для совместного получения тепла и холода 105
—— многоступенчатых цилиндров 58
—— паросиловых установок 93, 95
—— поршневых двигателей 51
—— реактивных двигателей 55, 56
—— тепловых насосов 105
—— теплофикационных установок 94
—— термотрансформаторов 106
—— турбин внутреннего сгорания 53
—— холодильных машин 103, 104, 105
Цилиндры — Безразмерная температура 135
— Нагревание — Расчет 133, 134, 136
— Обтекание 509
Циркуляция скорости жидкости 504

Ч

Чаплыгина формулы 510
Частота 339
—— звука — Восприятие 256
—— угловая 339
Число Рейнольдса 467, 485, 517
—— Фруда 517
Чувствительность фотоэлементов 364

Ш

Шары — Нагревание — Расчет 136
— Обтекание 512
— Охлаждение — Расчет 136
Шези формула 470
Шифринсона формула 471
Шероховатость абсолютная эквивалентная стенок труб 471
Шины — Допустимые нагрузки 351
—— прямоугольного сечения — Нагрузки допустимые 352
Шкалы лабораторных термометров 4
—— образцовых термометров 4, 5
—— температурные — Постоянные точки 3, 4; — Формулы перехода 1
—— температурные международные 2
—— температурные термодинамические 2
—— термических термометров 5
—— электроизмерительных приборов — Знаки установки и напряжения 370
Шлейфы магнитоэлектрических осциллографов 375
Штативные камеры 245, 248
Шум — Влияние на восприятие речи 258
— Воздействие на организм человека 258
— Измерение 258
— Понижение 266
— Спектры 264, 265
Шум вентиляционный — Глушение 267
—— выхлопа — Глушение 268
Шумомеры 258
Шунтовые машины — см. *Машины постоянного тока с параллельным возбуждением*

Щ

Щели — Гидравлический расчет 482
—— радиально-кольцевые 492
—— радиальные 492
Щелочные аккумуляторы 359, 360
Щеточные аппараты 382

Э

Эйлера метод изучения движения жидкости 503
—— теорема 506
—— уравнение движения 505

Эквивалент работы тепловой 40
—— тепломеханический 40
—— электрохимический 356
Эквивалентная мощность 430
Эквивалентный момент 430
Эквивалентный ток 428
Электрическая аппаратура 433—448
Электрическая прочность 330
Электрические величины — Приборы для их измерения 370
Электрические генераторы — см. *Генераторы электрические*
Электрические измерения 370
Электрические манометры 12
Электрические машины — см. также *Генераторы, Машины постоянного тока, Преобразователи частоты; Электродвигатели*
— Классификация 378, 379
— Коэффициент мощности номинальный 380
— К. п. д. 380
— Номинальная мощность — Определение 380
— Номинальное напряжение — Определение 380
— Параметры — Номинальные значения 379
Электрические машины взрывобезопасные 379
—— закрытые — Определение 379
—— защищенные — Определение 379
—— с естественным охлаждением — Определение 378
—— с посторонним охлаждением — Определение 379
—— с самовентиляцией — Определение 379
Электрические сети низковольтные промышленных предприятий — Напряжение 350
Электрические цепи переменного тока 340, 341
—— постоянного тока 338
—— с индуктивностью и сопротивлением 334
—— трехфазные 342
Электрический ток — см. также *Переменный ток; Постоянный ток*
— Измерение 373
— Мощность 344
— Работа 344
— Химические источники 356
Электрический ток в электролитах 354
Электрическое поле 330
— Напряженность 330
— Потенциал 330
Электрическое торможение 410
Электродвигатели—см. также *Асинхронные двигатели; Двигатели постоянного тока; Коллекторные двигатели с сериесным возбуждением; Конденсаторные двигатели однофазные; Синхронные двигатели; Электропривод*
— Выбор 426, 430
— Конструктивное исполнение 380
— Момент номинальный 380
— Мощность — Расчет по условиям нагрева 426
— Нагрев 427
— Определение 378
— Режим работы 427
— Схемы управления 436—448
— Указания по выбору 430
Электродвигатели переменного тока — Номинальный ток 350
—— постоянного тока — Номинальный ток 350
—— с несколькими ступенями скорости — Определение 378
—— с регулировкой скорости — Определение 378
—— с сериесной характеристикой — Определение 378
—— с шунтовой характеристикой — Определение 378
—— универсальные 409
Э. д. с. взаимоиндукции — Величина 333
Электроизмерительные приборы 370
— Классы точности 370
— Системы 371
— Условные знаки рода тока на шкале 370
Электролиз 355
Электролитическая диссоциация 354
Электролиты — Температурный коэффициент 355; — Удельная проводимость 355; — Электропроводность 354
—— аккумуляторных батарей — Удельный вес 357
Электромагнетизм 331
Электромагнитная индукция 332
Электромагниты 436
— Подъемная сила 337
Электромашинные усилители 388, 392
— Определение 378
— Применение 446
— Схемы 446
Электроника 360
Электронная эмиссия 360
Электронно-лучевые трубки 376
Электронные лампы 366 — см. также *Диоды; Кенотроны; Пентоды; Тетроды; Триоды*
Электронные осциллографы 376
Электронные приборы 360
Электроны 360
— Распределение по энергетическим уровням 272

Электроотрицательность атомов 273
Электропривод 410—432 — **см.** также *Системы генератор — двигатель*
— Динамика 421
— Время переходного процесса 423
— Кривые переходных процессов — Построение 425
— Определение приведенных маховых моментов 423
— Уравнение движения 421
— Электромеханические переходные процессы 424
Электропроводность электролитов 354
Электросопротивление чистых металлов 316, 317
Электротехника 328—448
Электротехническая сталь листовая — см. *Сталь электротехническая листовая*
Электротехнические материалы 343
Электрохимический эквивалент 356
Элемент Даниеля 356
—— Лекланше 356
Элементные схемы — Графические символы 438
Элементы водоналивные 356
—— гальванические 356
—— сухие 356
Элементы химические — Давления паров 321
— Периодическая система 269, 270
— Свойства 280, 282
— Соединения важнейшие 280, 282
— Температуры плавления и испарения 295
— Теплоты плавления и испарения 295
— Число электронов 274
Эллипс — Момент инерции 458
— Центр тяжести 458
Эмиссия автоэлектронная 360
—— термоэлектронная 360
—— фотоэлектронная 360
—— электронная 360
Эмульсионные смазки — см. *Смазки эмульсионные*
Энергия внутренняя 42
—— ионных кристаллических решеток 294
—— кинетическая — Потеря на удар — Теорема 506
—— магнитного поля 334
—— свободная 43
—— свободная образования химических соединений 304
—— связей двухатомных молекул 280
—— тока активная — Измерение 374
—— электрического поля конденсаторов 331
Энтальпия 43
—— азота 20, 21
—— ацетилена 34
—— бензола 35
—— бутадиена 34
—— влажного воздуха 110, 111
—— водорода 23
—— водяного пара 31
—— воды 72
—— воздуха 22
—— газов 19—35
—— гидроксильной группы ОН 26
—— закиси азота 28
—— идеального газа 519
—— кислорода 19
—— метана 32
—— окиси азота 25
—— окиси углерода 24
—— пара во влажном воздухе 108, 111
—— перегретого пара 72
—— пропана 33
—— пропилена 35
—— ртутного пара 96
—— сернистого ангидрида 29
—— сероводорода 29
—— сероокиси углерода 30
—— сероуглерода 30
—— углекислого газа 27
—— этана 32
—— этилена 33
—— этилового спирта 36
Энтропия азота 20, 21
—— ацетилена 34
—— бензола 35
—— бутадиена 34
—— воды 72
—— водорода 23
—— водяного пара 31
—— воздуха 22
—— газов 19—35
—— гидроксильной группы ОН 26
—— закиси азота 28
—— идеального газа 520
—— кислорода 19
—— метана 32
—— окиси азота 25
—— окиси углерода 24
—— перегретого пара 72
—— пропана 33
—— пропилена 35
—— ртутного пара 96
—— сернистого ангидрида 29
—— сероводорода 29
—— сероокиси углерода 30
—— сероуглерода 30
—— углекислого газа 27
—— этана 32
—— этилена 33
—— этилового спирта 36

Этан — Свойства 97, 102
— Свойства тепловые 32
Этен — см. *Этилен*
Этилен — Свойства 97, 102
— Свойства тепловые 33
Этиловый спирт — Тепловые свойства 36
Этин — см. *Ацетилен*
Эффект Джоуля — Томсона 92
Эхо 262

Я

Якори 381
— Обмотка 382
— Реакция 382
Яркость источников света 225

Технический редактор *Т. Ф. Соколова* Корректор *А. Н. Шеманова*
Переплет художника *А. Л. Бельского*

Подписано к печати 10/XII-1955 г. Т-10315. Тираж 50001—85000. (3-й завод). Печ. л. 35,25. Бум. л. 17,63. Уч.-изд. л. 55,30. Бумага 60×92¹/₁₆ Заказ 1660.

Отпечатано с матриц 1-й типографии Машгиза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10, в типографии № 1 Облполиграфиздата. Г. Саратов, проспект им. Кирова, 27.
Заказ 604